

# シーロメーターとラジオゾンデを用いた海洋上低層雲の研究

著者	翁 一城
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2008
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00000786/">http://id.nii.ac.jp/1342/00000786/</a>

修士学位論文

シーロメーターとラジオゾンデを用いた  
海洋上低層雲の研究

平成 20 年度

(2009 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海洋環境保全学専攻

氏名：翁 一城

# 目 次

1 章 研究の背景	1
2 章 KESS2005 の観測	
2-1 観測海域及び期間	2
2-2 観測システムについて	4
3 章 解析方法	
3-1 シーロメーターの測定原理	6
3-2 シーロメーターによる Backscatter(Bs)データ	6
3-3 雲底高度の判別方法	7
3-4 観測期間の時間-高度断面図	10
4 章 雲底高度の解析結果	
4-1 観測期間の雲底高度の傾向	26
4-2 判別方法による雲底高度の違い	28
5 章 海上気象データと第一雲底高度の関係	30
6 章 ラジオゾンデデータとの比較	
6-1 ラジオゾンデとシーロメーターのデータ	35
6-2 結果及び考察	59
謝辞	78
参考文献	78

## 1 章 研究の背景

雲は現在の気候変動予測の上で不定性の大きい対象である。また、近年、大気海洋相互作用と呼ばれる研究分野が注目されており、海洋が海洋上の大気に及ぼす影響やその逆の効果が観測と理論の両方から盛んに研究されている。

本研究室のシーロメーター（雲底高度計；Vaisala, Model CT25K）を用いた研究は、主に海上気象データとの比較を中心に行われてきた。ここで、シーロメーターによって得られる後方散乱係数の鉛直プロファイルにから Vaisala の内部アルゴリズムによって判別される雲底高度は、雲によって生じる後方散乱係数の極大値よりもやや上の高度を雲底と判断しており、ライダーにおける Klett<sup>1)</sup>の方法のように遠方（ここでは上方）からの解法に基づくものであることが、そのマニュアルの記述からも示唆される。（詳細は公開されていない）。そこで、今回、閾値法を用いることにより、下方から雲底を判別し、独自に雲底高度を求めることにした。

本研究では、日米協力で平成 17 年夏季に西部太平洋上で行われた集中観測「黒潮続流観測計画 (Kuroshio Extension System Study; KESS)」(以下、KESS2005 と記す)において、日本側チームが担当したラジオゾンデ観測、及びシーロメーターのデータを用いて、海洋大気上の低層雲の特徴と前述の 2 つの異なる判別手法による雲底高度と気象データの相互比較を行い、2 つの判別手法の評価を行った。



## 2 章 KESS2005 の観測

KESS は黒潮続流・再循環流域での海水温フロントにおいて大気がどのように応答しているかを調べることを目的として行われた。

### 2-1 観測海域および期間

#### a) 観測海域 (図 2-1)

西部北太平洋 (北緯 30 – 39 度, 東経 143 – 150 度)

#### b) 期間

平成 17 年 6 月 17 日 (水): 横浜港 出港

平成 17 年 7 月 17 日 (月): 横浜港 帰港

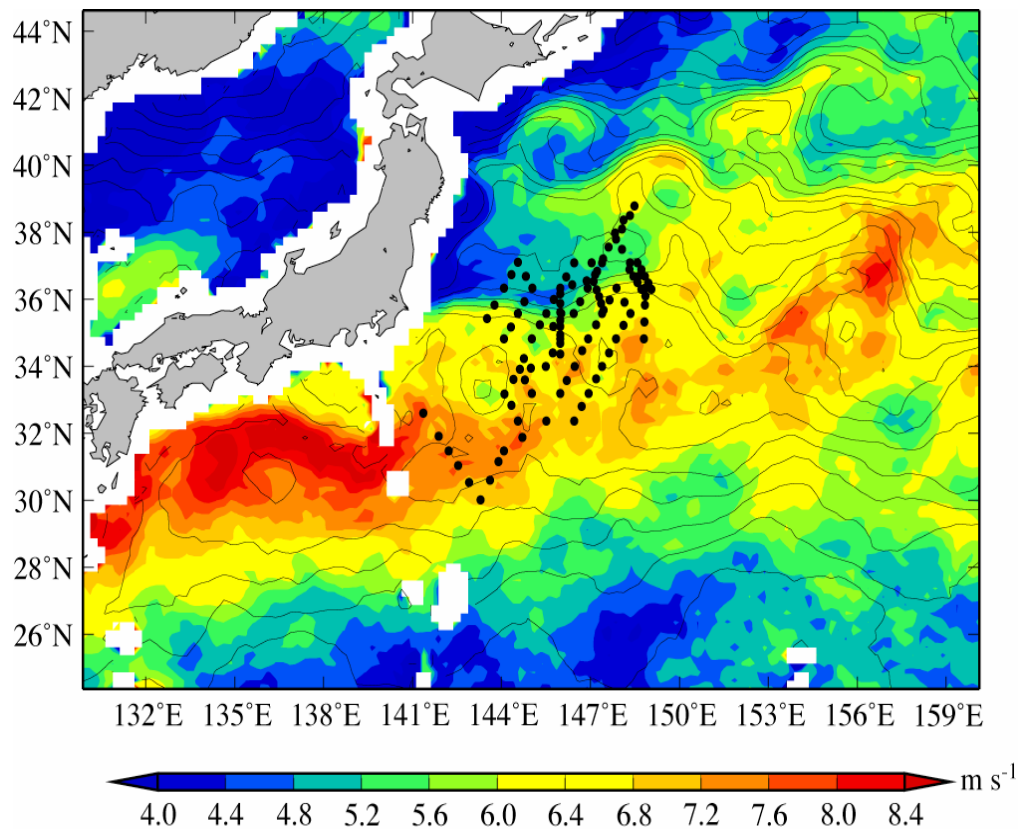


図 2-1 AMSR-E 海上風速 (カラー)、海面水温 (コンター: 1 °C 間隔) 及びラジオゾンデ測点 (黒点)。

図 2-1 で示された観測海域において、ラジオゾンデによる大気観測が行われているが、その放球の順番を航路軌跡とともに示した図を示す。北緯 35-37 度に海水温フロントが比較的シャープな海域があり、それを横切る形で何度も観測が行われている。

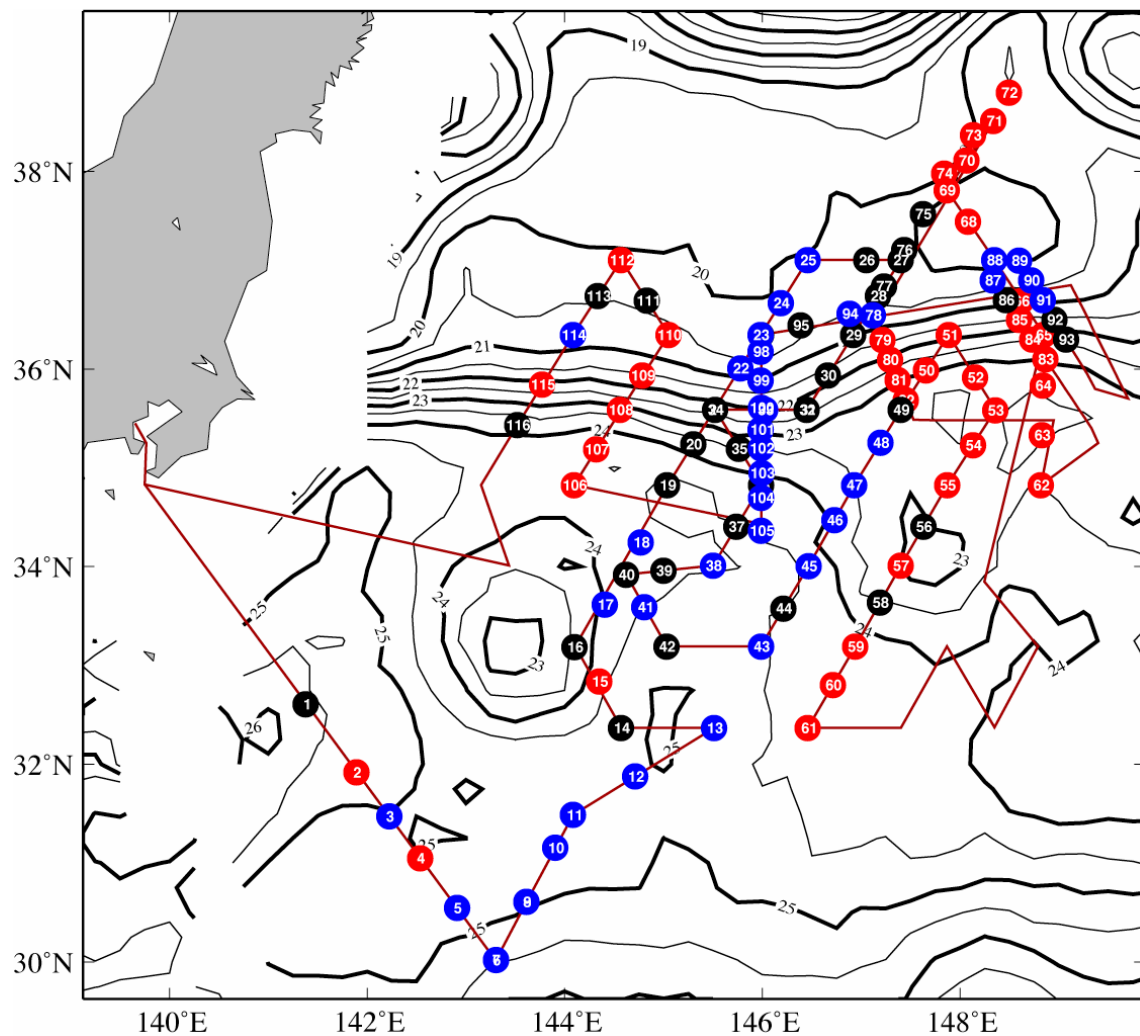


図 2-2 AMSR-E 海面水温(コンター: 0.5 °C 間隔)及び GPS ラジオゾンデ測点。番号は測点番号。赤: SST-AT > 0.23 °C, 黒: -0.65 < SST-AT < 0.23, 青: SST-AT < -0.65。赤(青丸)の数は SST-AT の上(下)位 40 個。

## 2-2 観測システムについて

### a) 使用観測船

R/V Roger Revelle (米国スクリプス海洋研究所所有)



写真 1 使用観測船

### b) GPS ラジオゾンデ観測

受信機システム: Vaisala DigiCORA III (京都大学所有)

アンテナ: Vaisala CG25 ポータブルアンテナ (京都大学所有)

センサー: Vaisala RS92-SGP (センサー計 120 個。そのうち、1 個がテスト用、2 個が温度センサー部断線、1 個が放球失敗。116 個がデータ取得成功。)

アンテナはロープで固定し、放球は相対風向によって船尾のどちらかのサイドから行われた(写真 2)。実際の観測では計 116 個のゾンデを放球し(図 2-2)、平均して高度約 25 km までの鉛直プロファイルを観測することができた(受信時間は約 100 分程度)。KESS の海洋観測は海面高度計を搭載した衛星の軌道をなぞるように緯度約 0.8 度間隔で行われたのに対し、ラジオゾンデ観測はそれらの海洋観測点とその中間点でも観測を行い、約 0.4 度間隔のデータを取得することができた。



写真 2 GPS ラジオゾンデ放球時の様子

c) シーロメーター観測

Vaisala 社製 CT25K (東京海洋大学所有)

通常の航海の揺れに耐えて使用するため、ショックアブソーバーを溶接し、その上に固定するようにして船橋に設置した (写真 3)。シーロメーター観測は 1 分毎に連続観測で行われ、出港から帰港まで特にトラブルもなくデータ取得できた。本観測で用いたシーロメーター (CT25K) の仕様を表 1 に示す。本観測時にはエアロゾルからの信号もより見えるように通常より 100 倍感度を上げて記録しているので、Bs の値が  $0.032 \text{ km}^{-1}\text{sr}^{-1}$  で飽和している。また、表 1 であるように内部での雲底の計算にあっては全メモリのデータを使っているので 15 m の分解能になっているが、記録時にはその分解能を 30 m に下げ、データ出力の負荷を下げていることにも注意する。

レーザー	InGaAs Diode Laser
波長	$905 \pm 5 \text{ nm at } 25^{\circ}\text{C}$
パルスエネルギー	1.6 mJ
パルス幅	100 ns
光学系	単レンズ (14.5 cm 径)
測定間隔	最小 15 秒、本観測時 60 秒
測定距離	最大 7.5 km
雲底高度検出	3 層まで
分解能	雲底: 15 m, プロファイル: 30 m
大きさ・重量	1335x447x378, 35kg

表 1 シーロメーターCT25K の仕様



写真 3 本観測時に用いたシーロメーター (CT25K)

### 3 章 解析方法

#### 3-1 シーロメーターの測定原理

本シーロメーターの計測方法はいわゆるライダー (lidar = light detection and ranging) の原理に基づいている<sup>2,5)</sup>。シーロメーター本体から、パルスレーザー( $905 \pm 5 \text{ nm}$ )を上空に向けて発射し、レーザーが物体(雲)に当たると発生する後方散乱(Backscatter)光を捉える。その Backscatter(以下 Bs)の得られるまでの時間差とその強度により、雲の有無およびその高度を知ることができる。Bs の鉛直分布(プロファイル)の形状は、その距離にある散乱体の光学的特性とその距離までのレーザー光の透過率によって決まるので、一般に複雑なプロファイルになる。この計測原理を表した模式図を図 3-1 に示す。

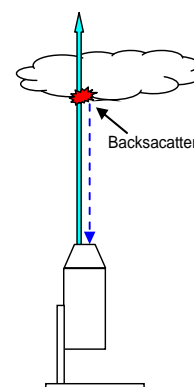


図 3-1 シーロメーターによる計測方法

#### 3-2 シーロメーターによる Backscatter (Bs) データ

Bs の鉛直プロファイルを Vaisala 社の CT-VIEW というソフトウェアを用いることにより、大気の状態を視覚化できる。その例を図 3-2 に示す。

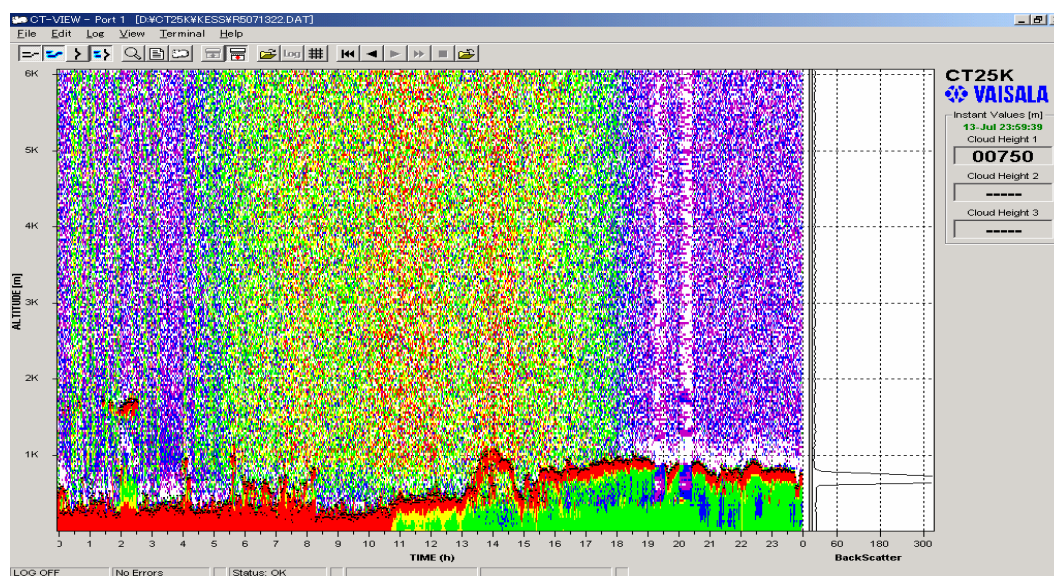


図 3-2 CT-VIEW による大気の様子（上図は 2005/7/13 の例）



図 3-2 では、シーロメーターにより得られた Backscatter が、右に示されている。ここで示された Backscatter の信号強度は、2005/7/13 23:59 のものを示している。得られた Bs の強度によって色分けをすることで、大気の状態を視覚化している。図中にある黒点は、Vaisala の判定による雲底高度を表す。CT-VIEW による全観測データを 3-4 章に掲載する。

### 3-3 雲底高度の判別方法

シーロメーターにより得られた、Bs [km/sr] データを用いて作成した Bs の鉛直分布の例を、図 3-3 に示す。

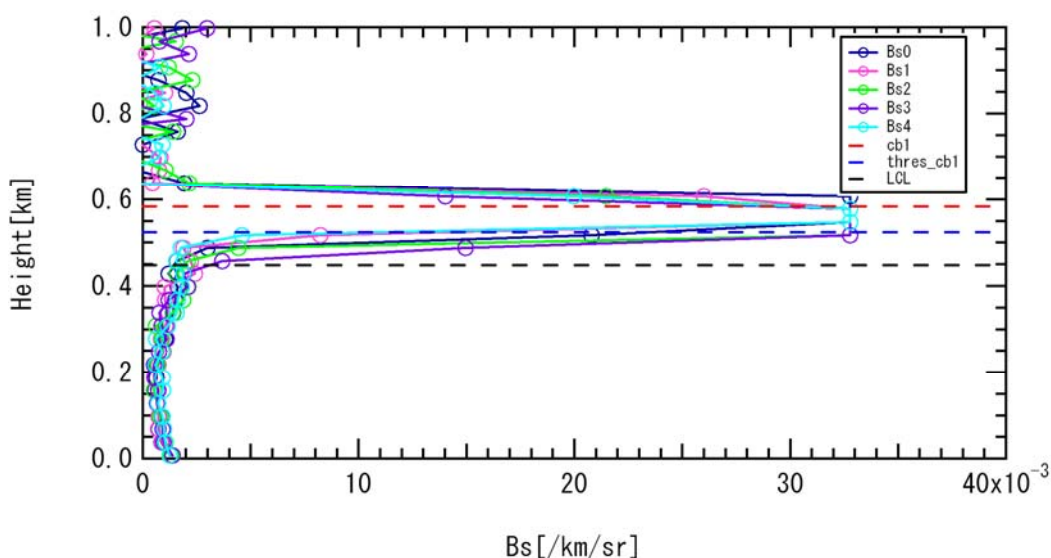


図 3-3 シーロメーターで計測された Backscatter の鉛直分布

図 3-3 において、縦軸は高度 [km]を表し、横軸は Bs [km/sr]の強度を表している。高度 0 km から丸のマーカが等間隔で示されているが、この間隔は高度 30 m である。つまり、高度変化 30 m 毎における Bs の値を、この図は表している。尚、Bs の鉛直プロファイルは 1 分毎に取得されており、図 3-3 では、ある時刻から 5 分間の Bs の鉛直プロファイルを Bs0~Bs4 として同時に示している。図 3-3 の高度 450 m~700 m に着目すると、Bs 値が大きい箇所が集中しており、このあたりで雲が存在していることは予測できるが、どこをもって雲底高度とみなすのかという不定性がある。そこで本研究では、Bs 鉛直プロファイルからの雲底高度を、Vaisala の報告値と下層からの閾値法で求めた値と比較した。さらに持ち上げ凝結点高度を海上気象データから求め示した。

(a) Vaisala の内蔵アルゴリズムによって判別された雲底高度 (cb と記す)

(b) 下方から Bs 値を調べて、 $0.01 \text{ [km/sr]}$ を連続して 2 点以上にわたり超えた場合の最初の高度を、閾値法による雲底高度とする。(thres\_cb と記す)。

最初に、判別法 (a) の cb1 を説明する。シーロメーターは図 3-3 のような鉛直プロファイルが与えるとともに、自動的に雲底高度を判別する。その最下層の雲底高度を cb1 とする。図 3-3 を例とすると、高度約 600 m 付近の大きな Bs 値の減衰が得られている高度付近に雲底が判別されていることが多いのに対し、高度 450~500m のような Bs が大きくなり始める高度前後には雲底が判別されていないことから、Klett<sup>1)</sup>の方法に似て、遠方(上方)からの後方散乱係数の値とその変化率に関係しているようである<sup>4)</sup>。この判別方法は通常のライダーでの雲底判別に用いられている低高度から(下層)の雲底下部での信号変化率による検出<sup>3)</sup>とは判別の方向が逆である。Vaisala の方法では、高度 7.5 km まで最大 3 層の雲底高度を検出する。そこで、1 層目を cb1、2 層目を cb2、3 層目を cb3 と呼ぶことにする。本観測時において cb2 及び cb3 が判別された例は、cb1 と比べ圧倒的に少ない。(最下層目の雲が厚く、レーザー光が通過しない場合、2 層目以上は存在しても検出できない。)

次に、判別法 (b) の thres\_cb1 について説明する。cb は上層から判別されており、かつ図 3-3 を例とすると、下層から見て最初に大きく Bs が増加している 450 m~500 m の高度に雲底が判別されていなかった。そのため、2 点以上連続して Bs が  $0.01 \text{ km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ を超えた場合の下点の高度を雲底高度とする閾値法を用いることによって、Bs が急増化する高度を雲底高度とみなすようにし、これを thres\_cb と呼ぶことにする。ここでは、 $0.01 \text{ km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ という閾値はエアロゾルとしては大きすぎるが、雲と判断して十分な値らしいという経験的な値である。また、2 点以上というのはノイズ的な信号に対処するためである。この閾値法による雲底判別は、高度 3 km まで最大 2 層検出し、1 層目の雲底を thres\_cb1、2 層目の雲底を thres\_cb2 とする。

最後に、持ち上げ凝結点高度（LCL と記す）についてであるが、これは **cb1**、**thres\_cb1** との比較に海上気象データから求めた。この高度は、海面(地表面)上の空気塊が、周りの空気塊との混合を起こさず、断熱的に上空まで上がった場合、この高度において凝結しうるということを示す雲底高度の下限である。故に、基本的に LCL の高度より、**cb1** 及び **thres\_cb1** の判別高度が高くなっていることが期待される。ここで、用いた持ち上げ凝結温度  $T_L$  を求める式は(3-1) 式、持ち上げ凝結点高度 LCL は(3-2)式である。

$$T_L(K) = 1/[1/(T_d - 56) + \ln(T / T_d) / 800] + 56 \quad \cdots (3-1)$$

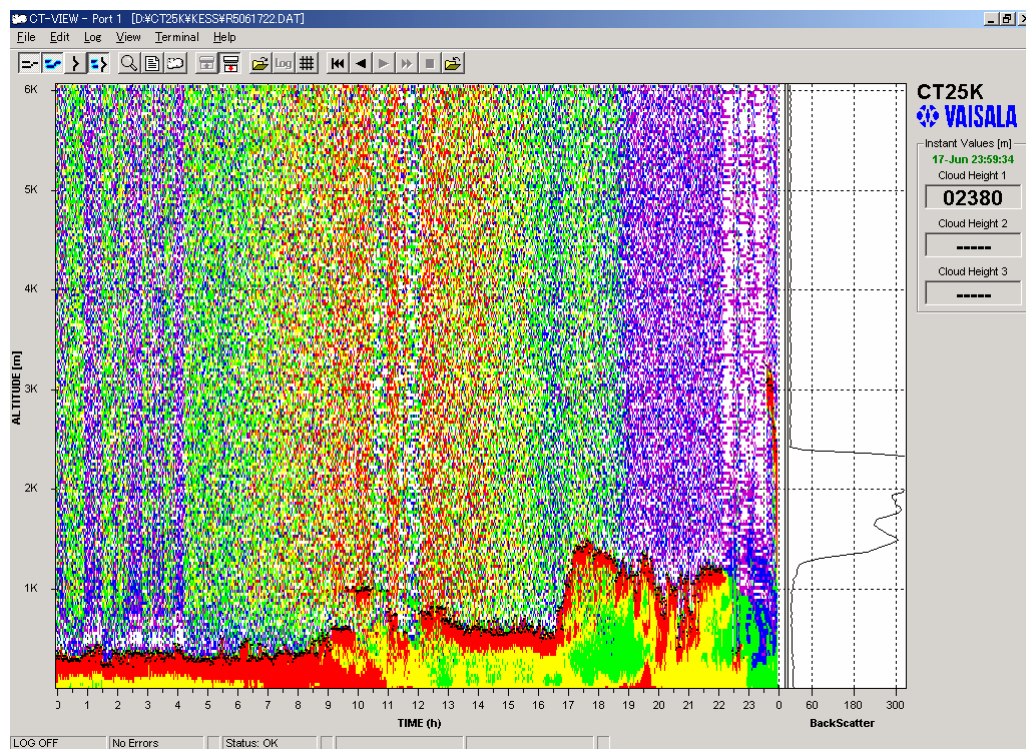
$$LCL(m) = (T - T_L) / \Gamma_d \times 1000 \quad \cdots (3-2)$$

(3-1)及び(3-2)式において、 $T$  は温度、 $T_d$  は露点温度を表し、単位は絶対温度 [K]である。また、(3-2)式における  $\Gamma_d$  は、大気 of 温度勾配を示す乾燥断熱減率 [°C/km]である。一般的に地球表面上での乾燥断熱減率は、約 9.8 °C/km であるとされており、今回の計算においてもその値を用いることにした。 $T$  と  $T_d$  は観測船 R/V Roger Revelle（米国スクリプス海洋研究所所有）で計測された海上気象データを用い、LCL を計算した。

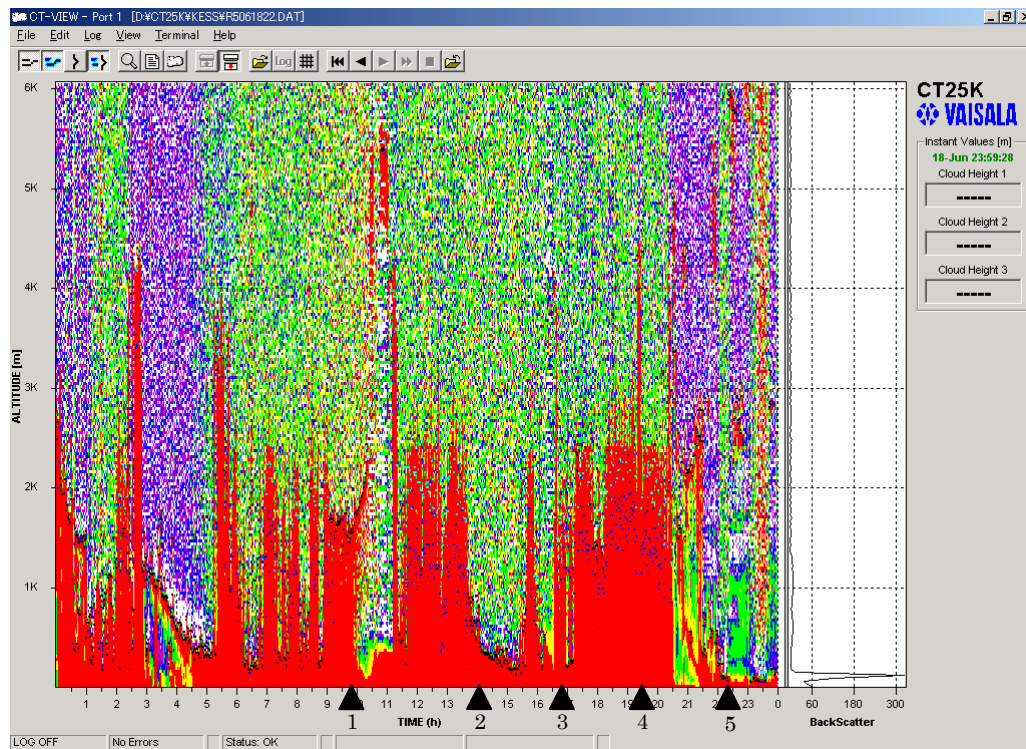


### 3-4 観測期間の時間-高度断面図（図中にある▲はラジオゾンデ放球時の時刻を示す）

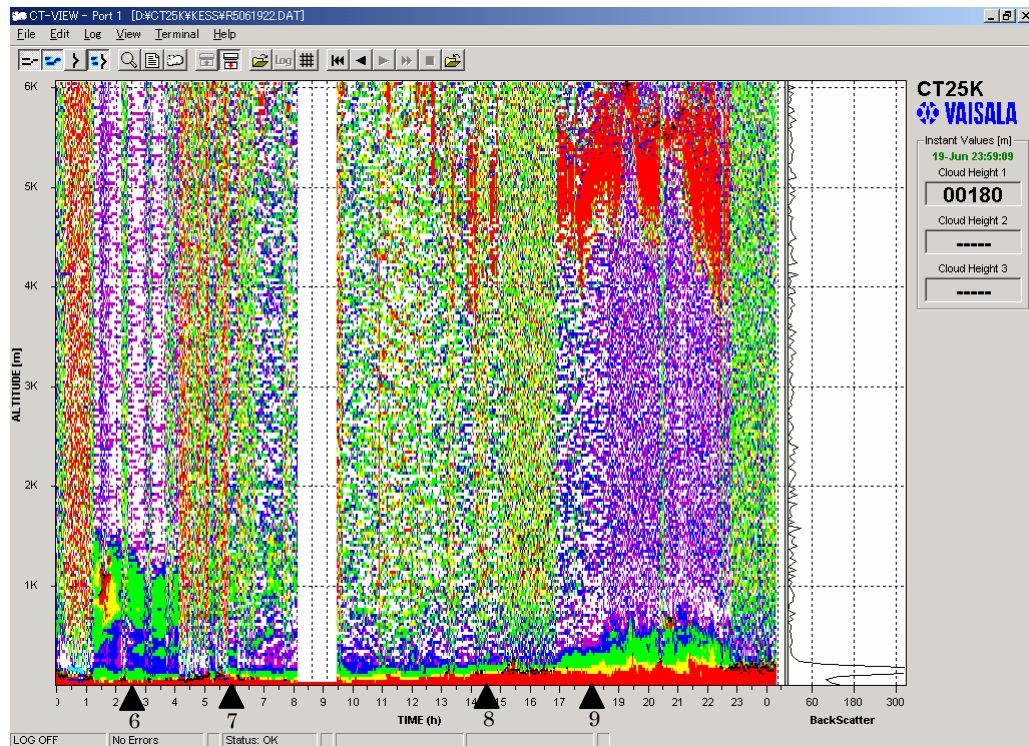
2005/06/17



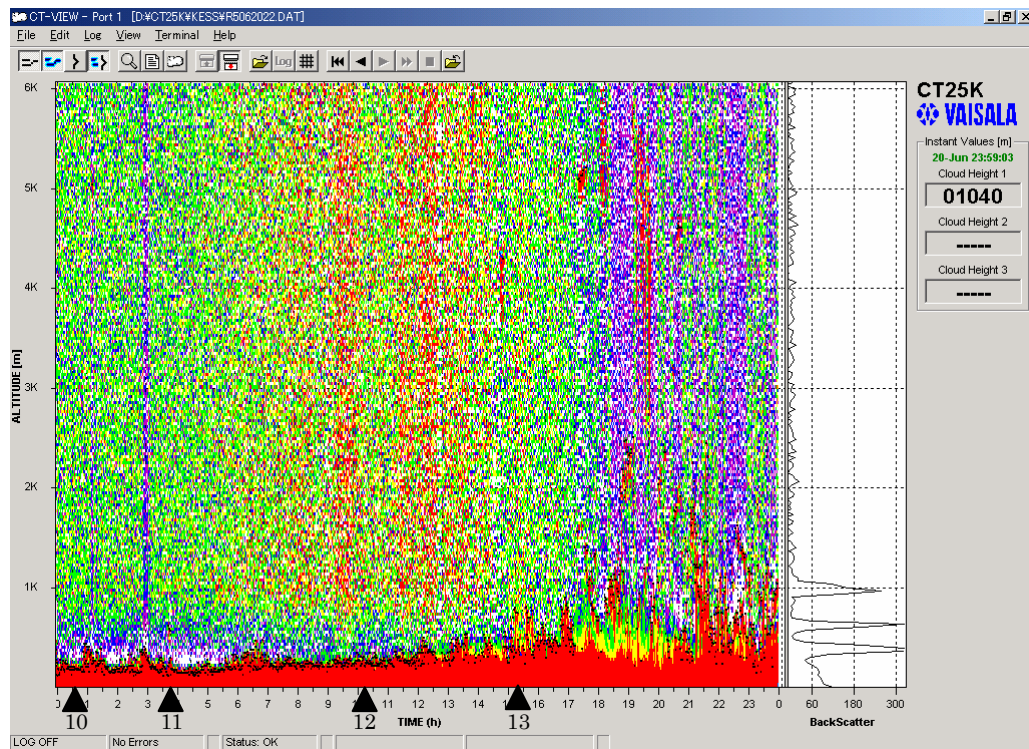
2005/06/18



2005/06/19

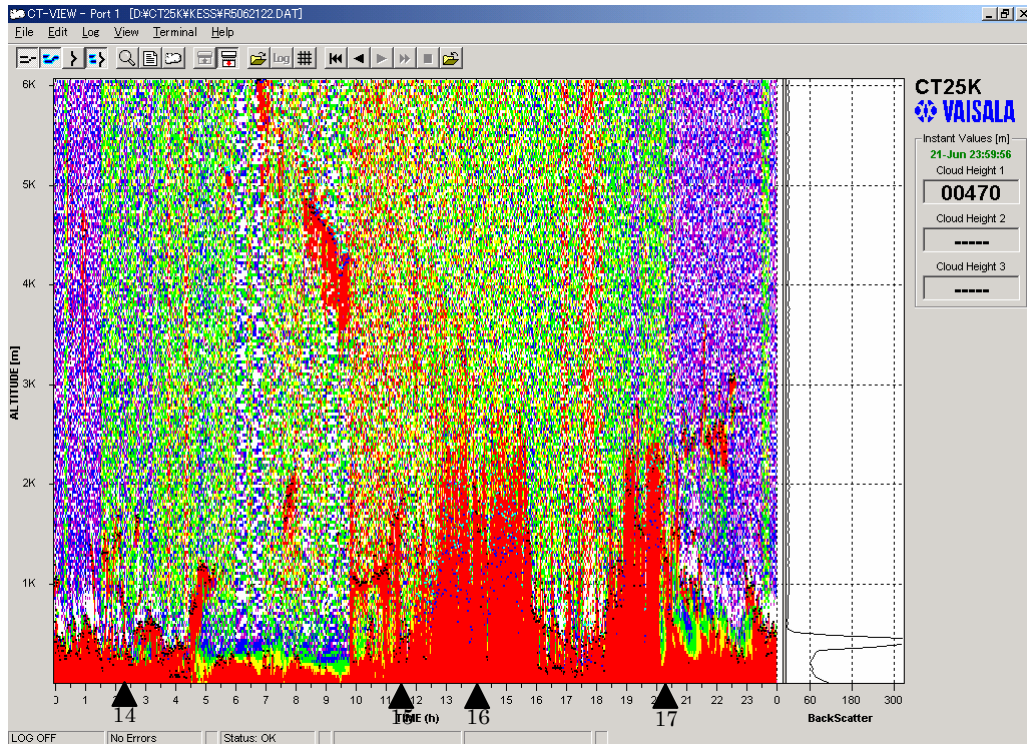


2005/06/20

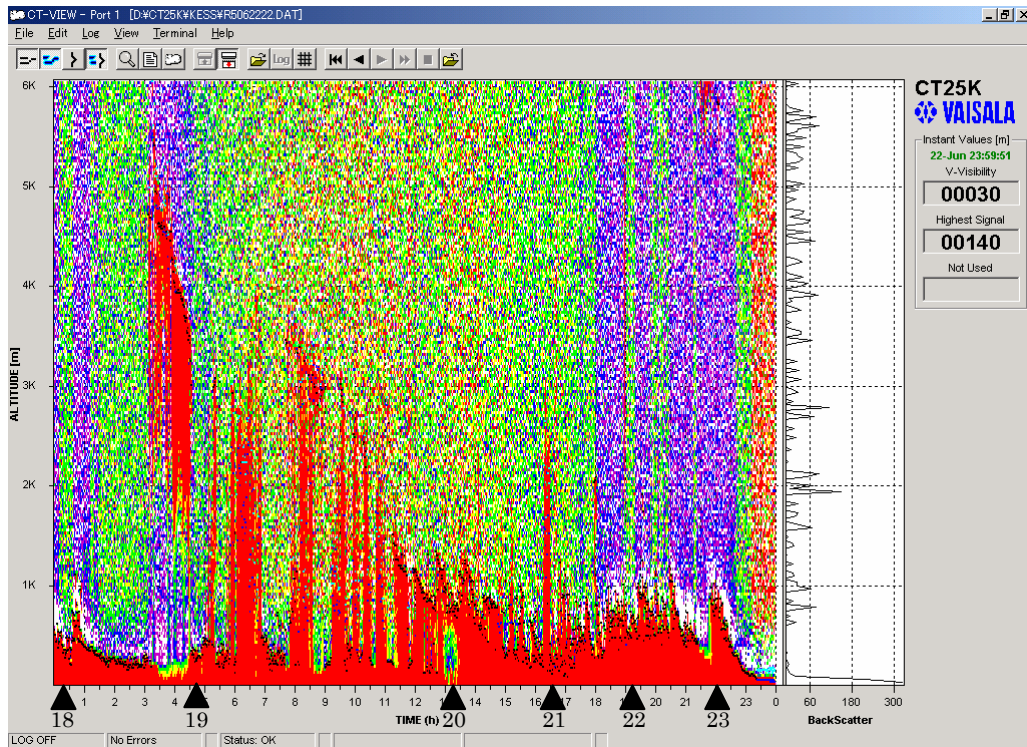




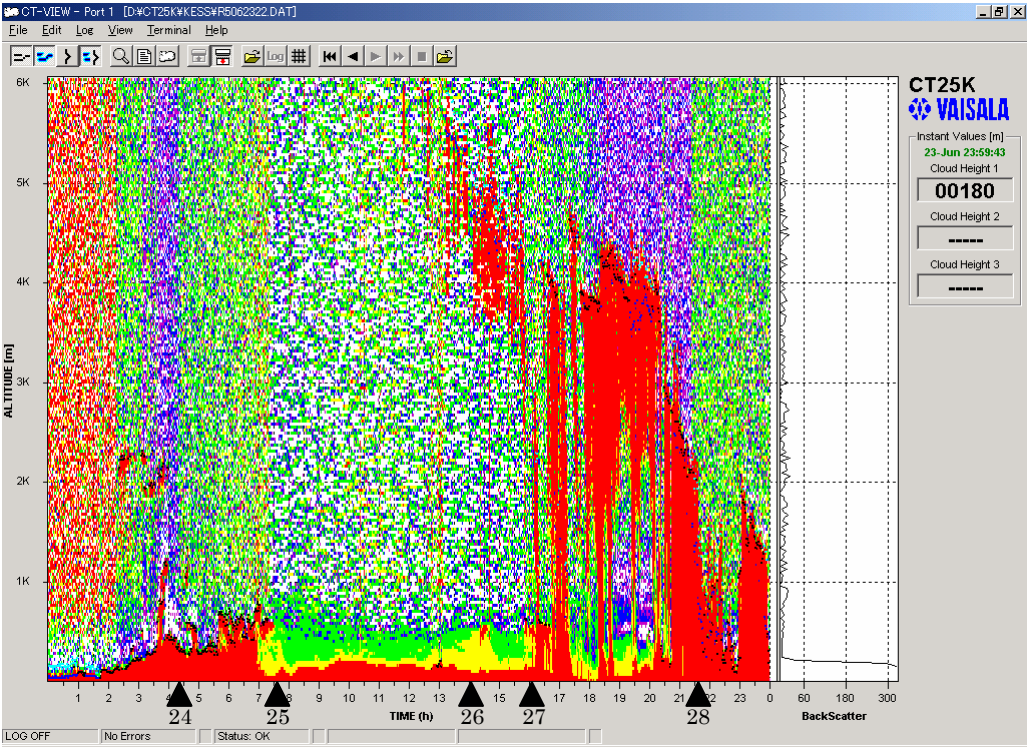
2005/06/21



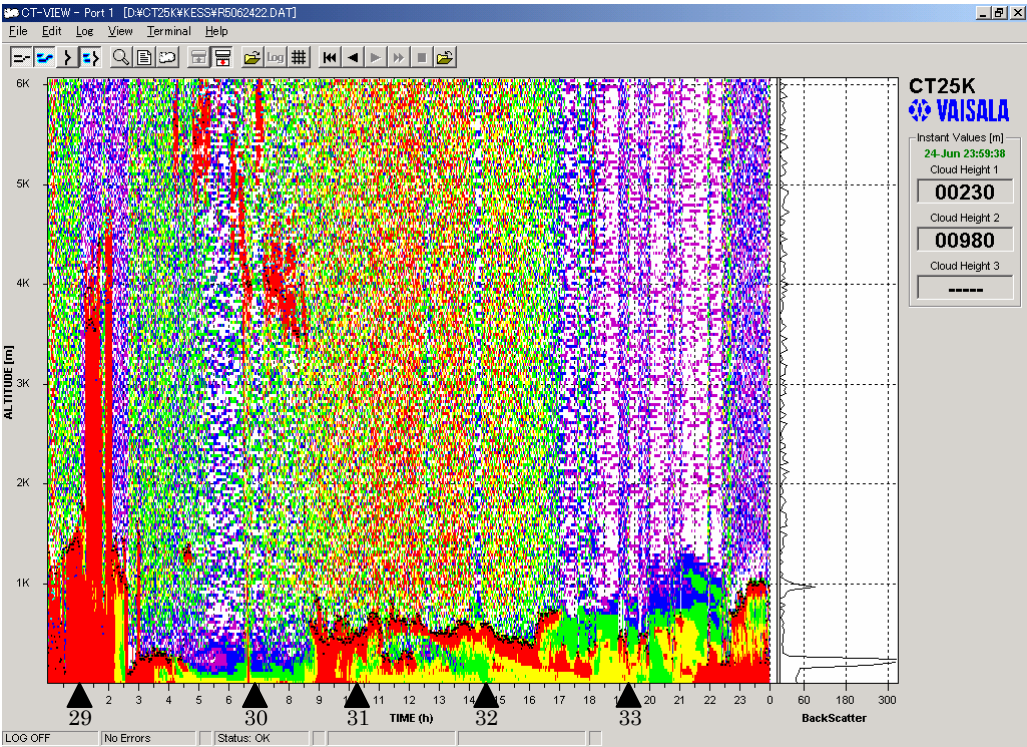
2005/06/22



2005/06/23

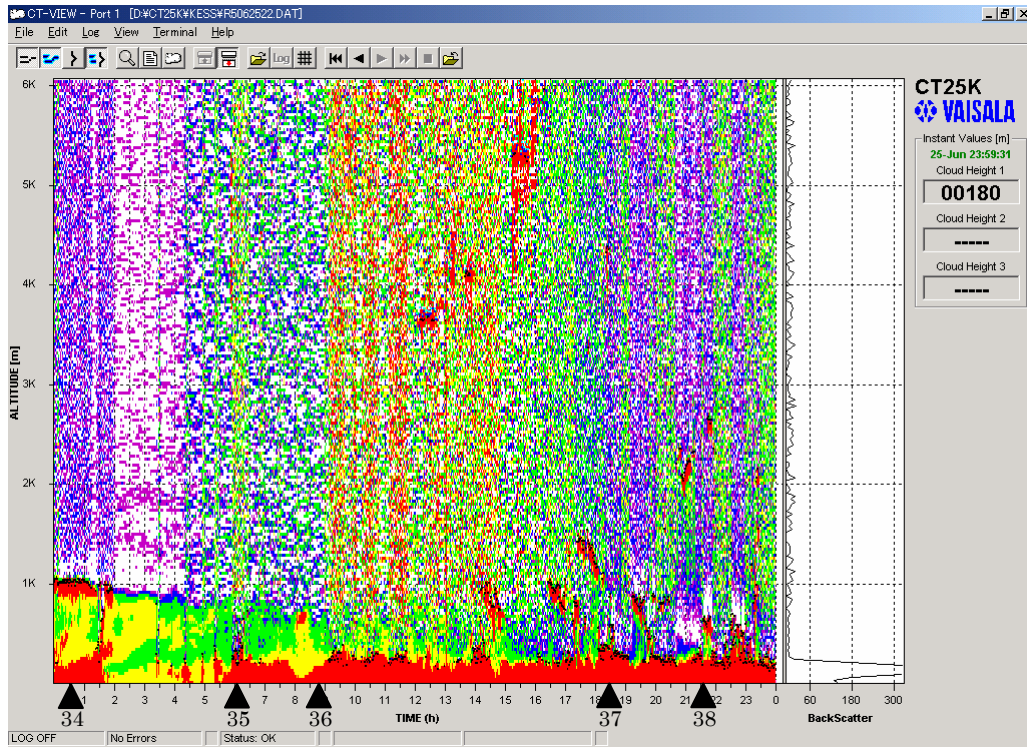


2005/06/24

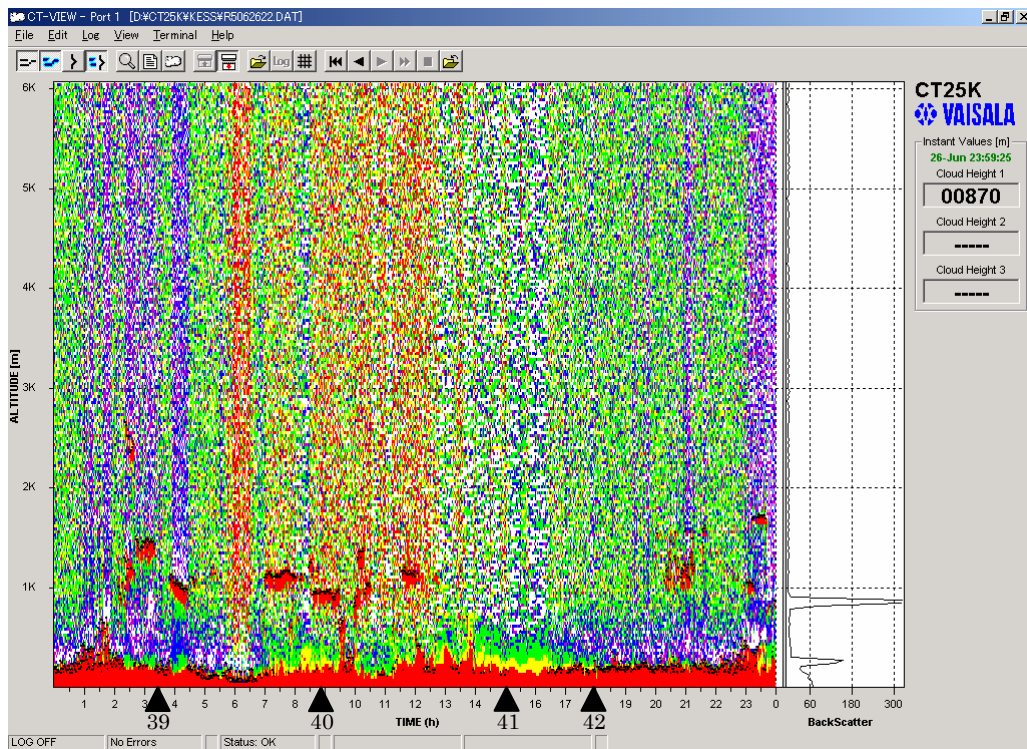




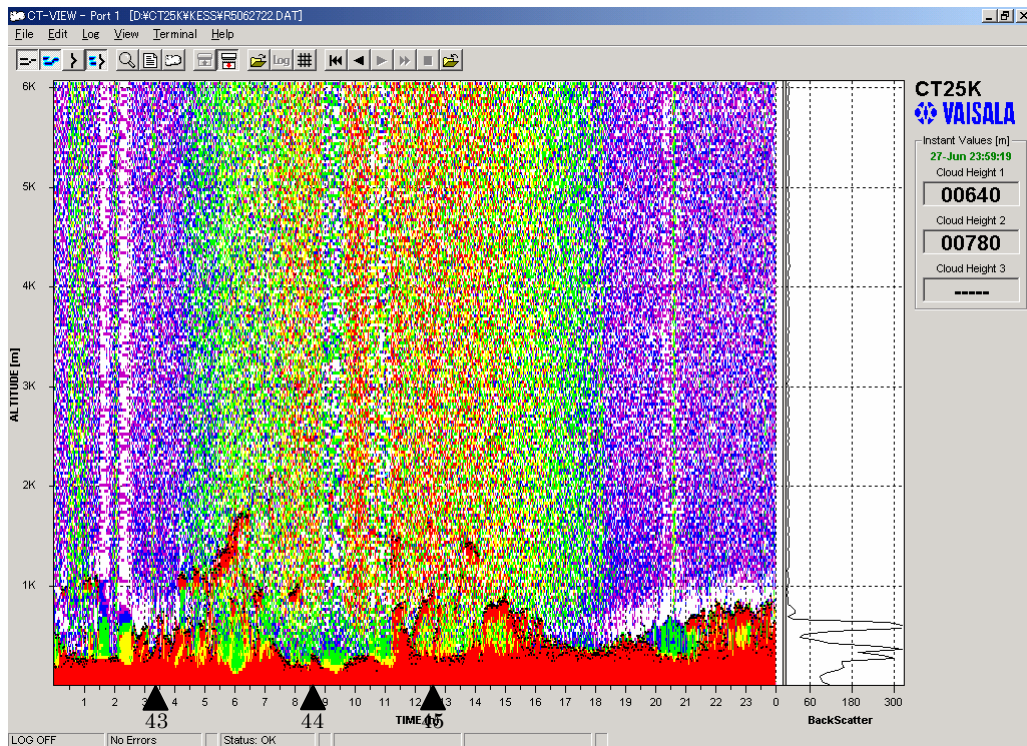
2005/06/25



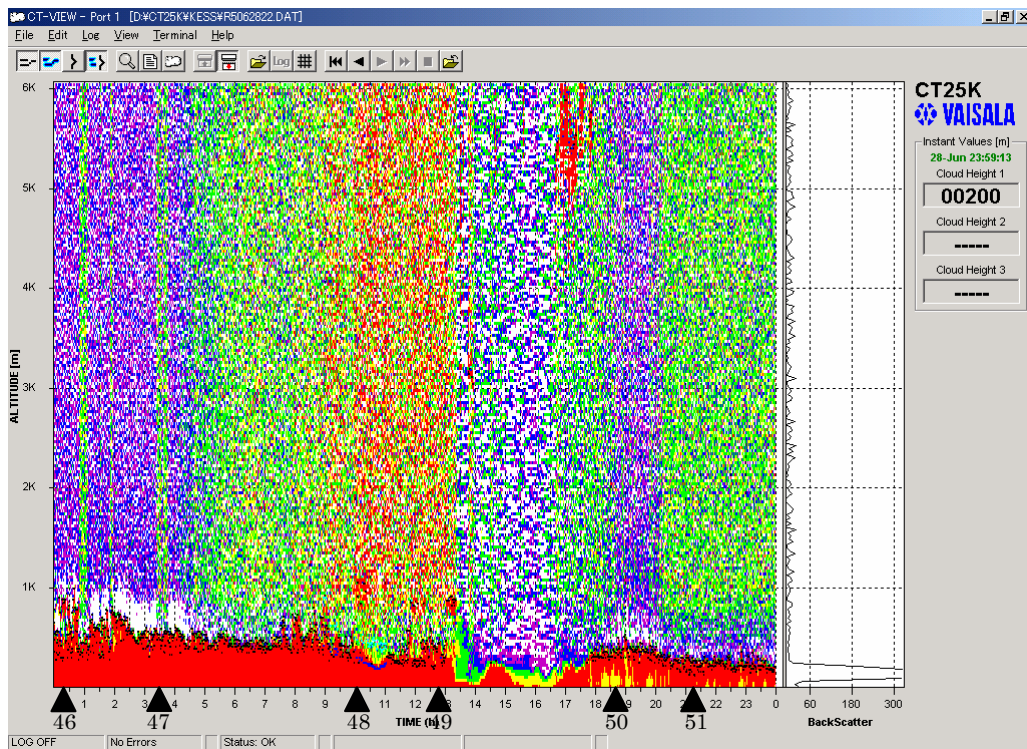
2005/06/26



2005/06/27

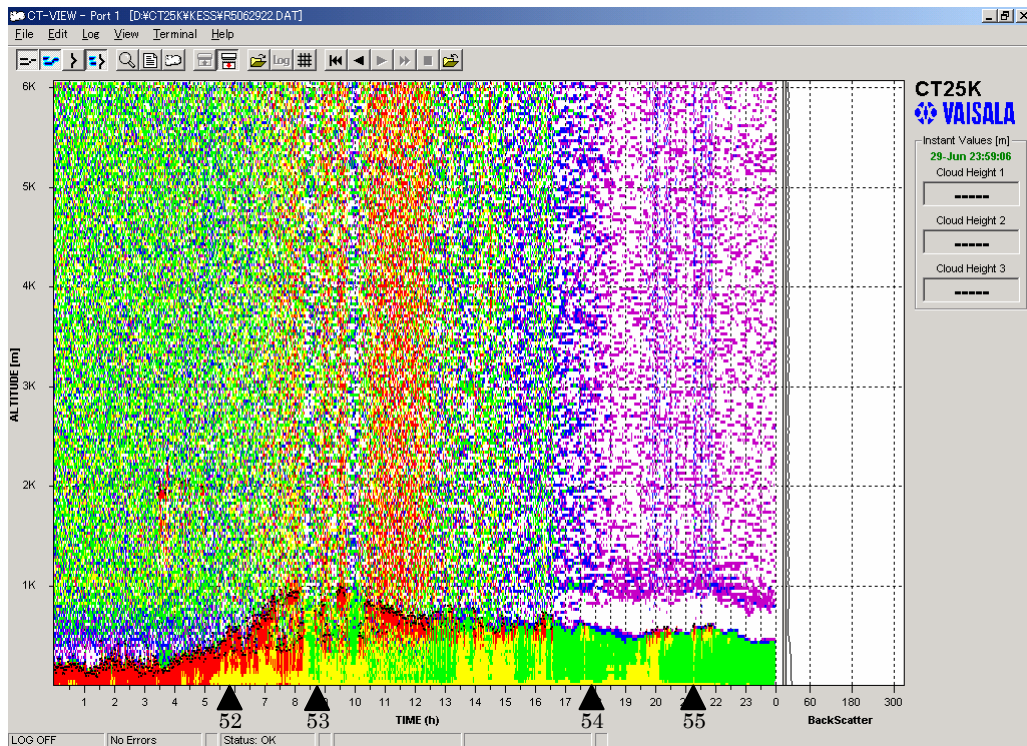


2005/06/28

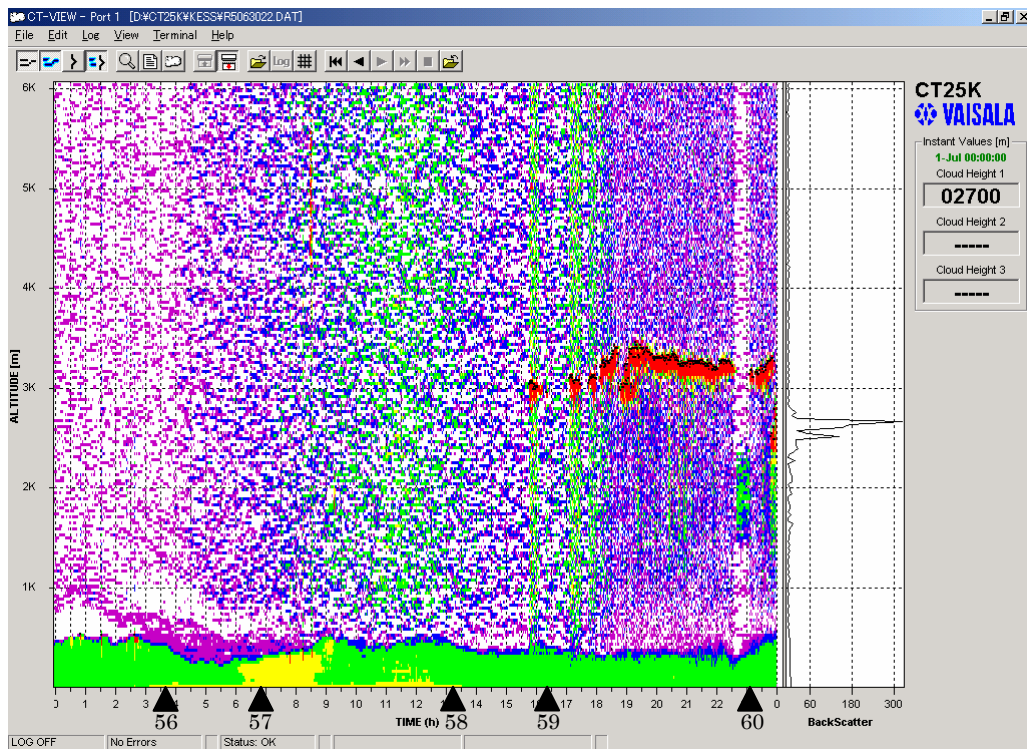




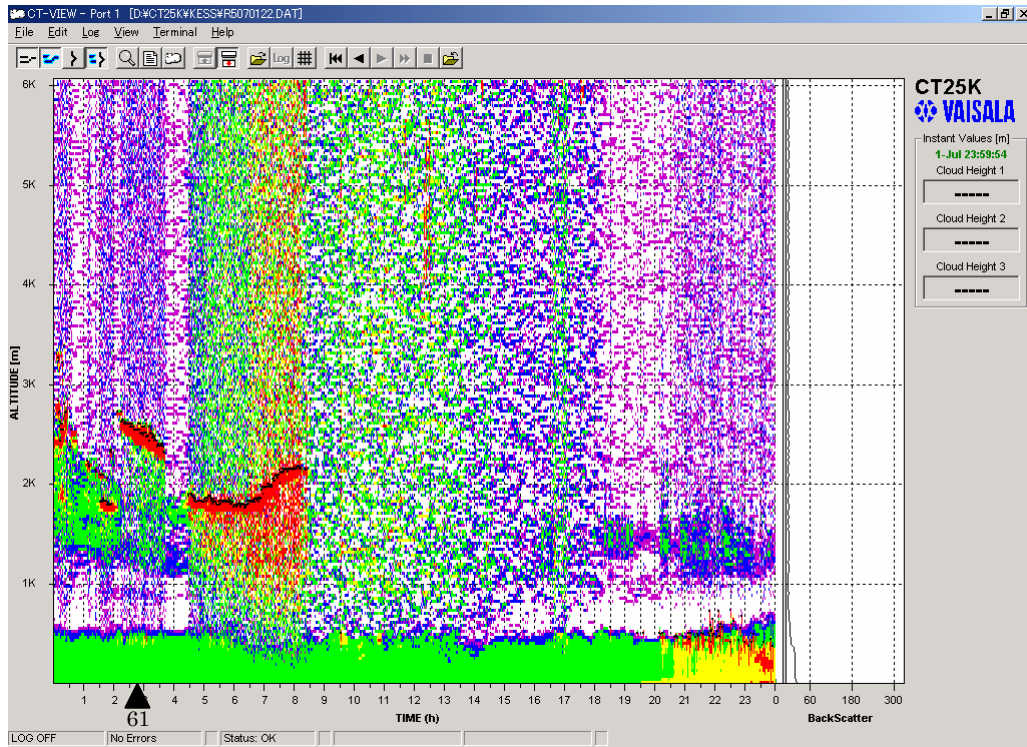
2005/06/29



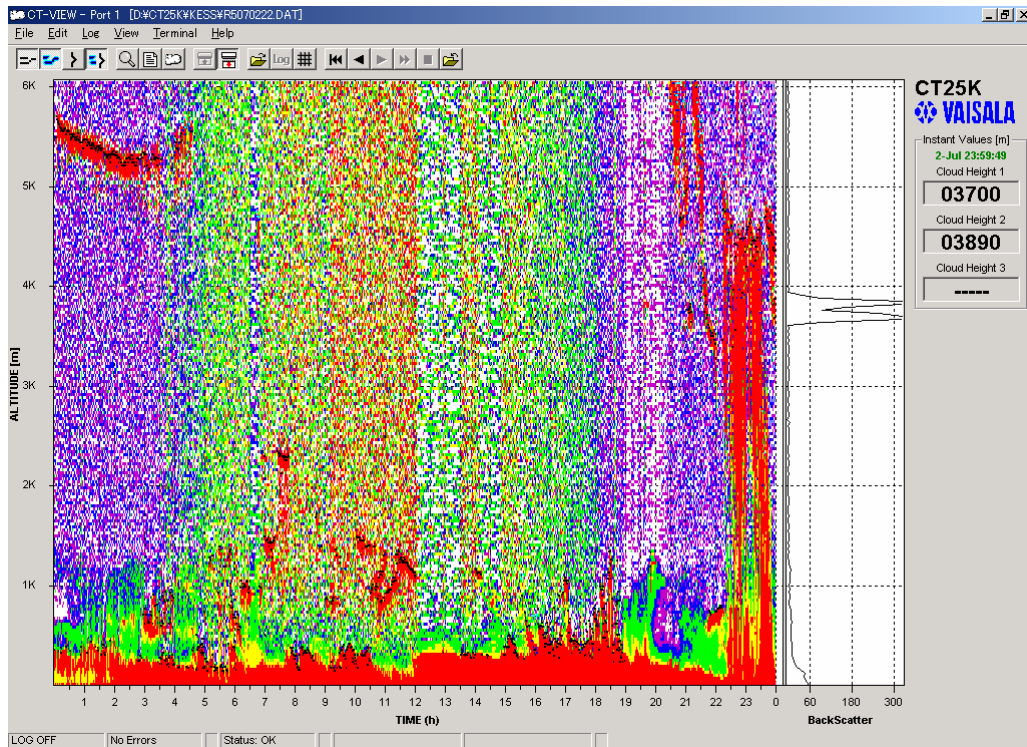
2005/06/30



2005/07/01

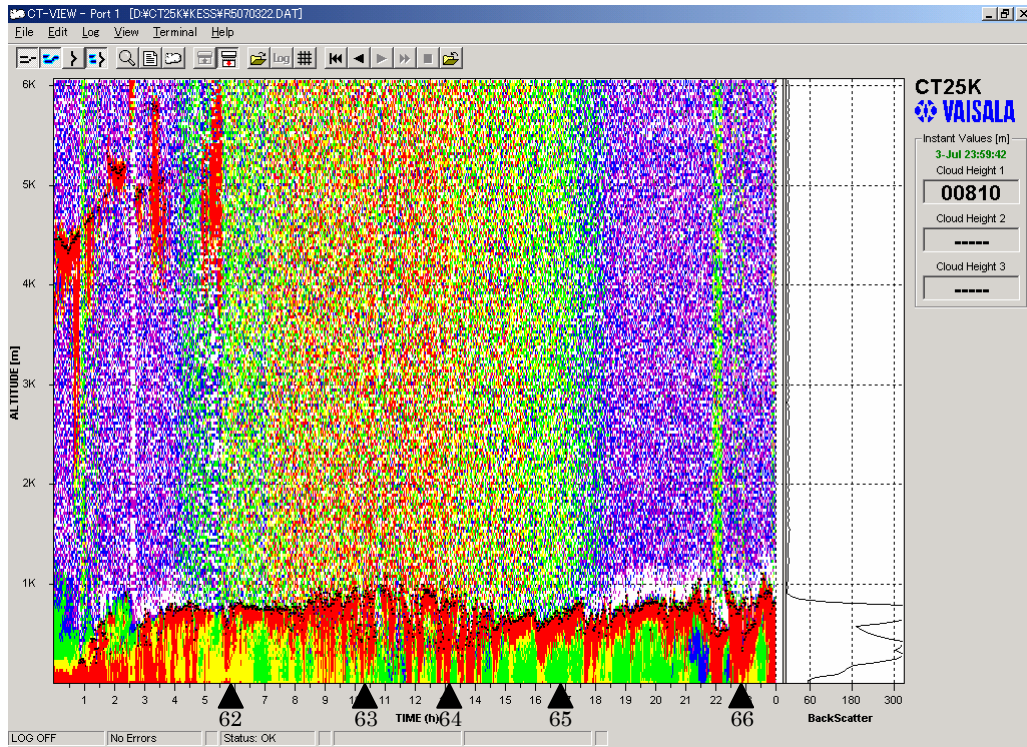


2005/07/02

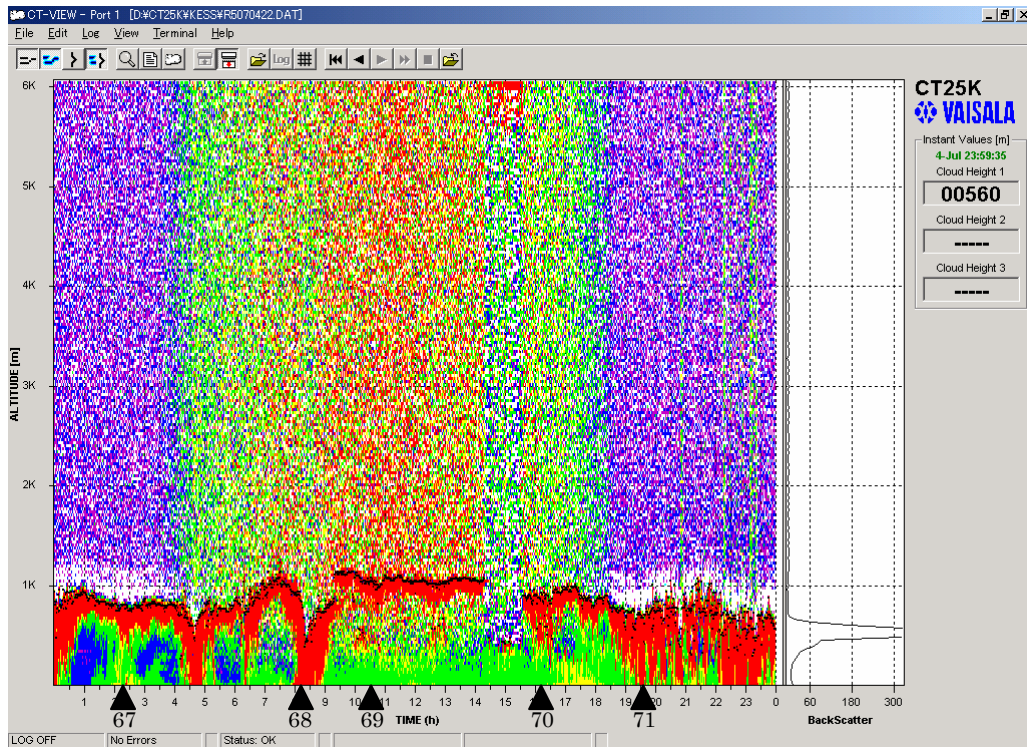




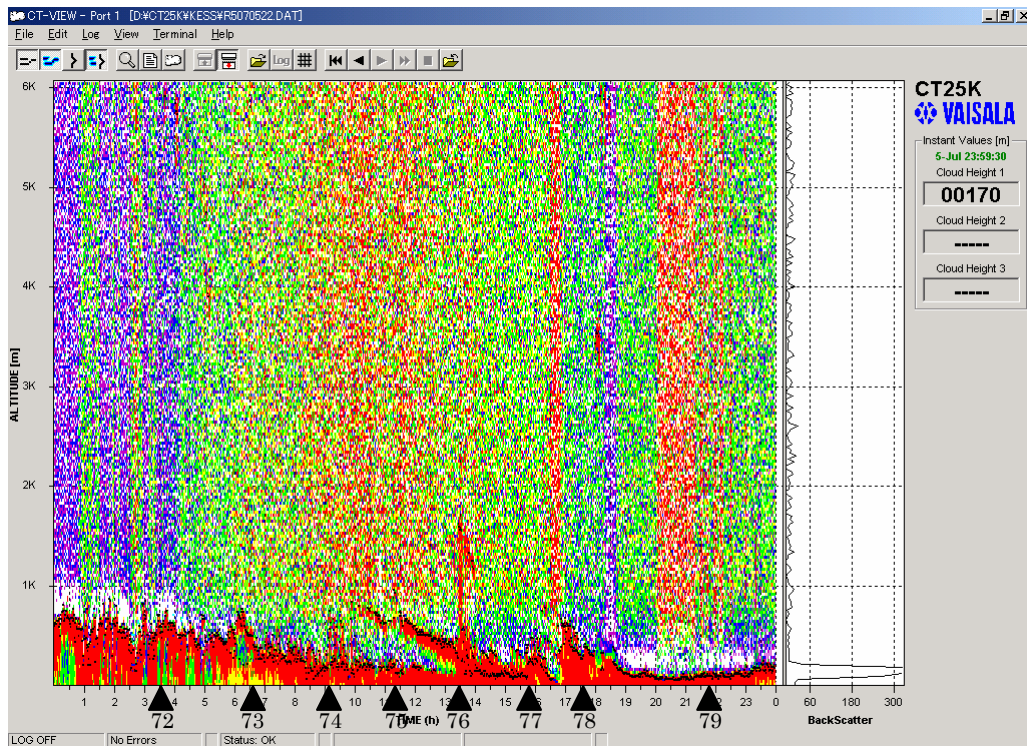
2005/07/03



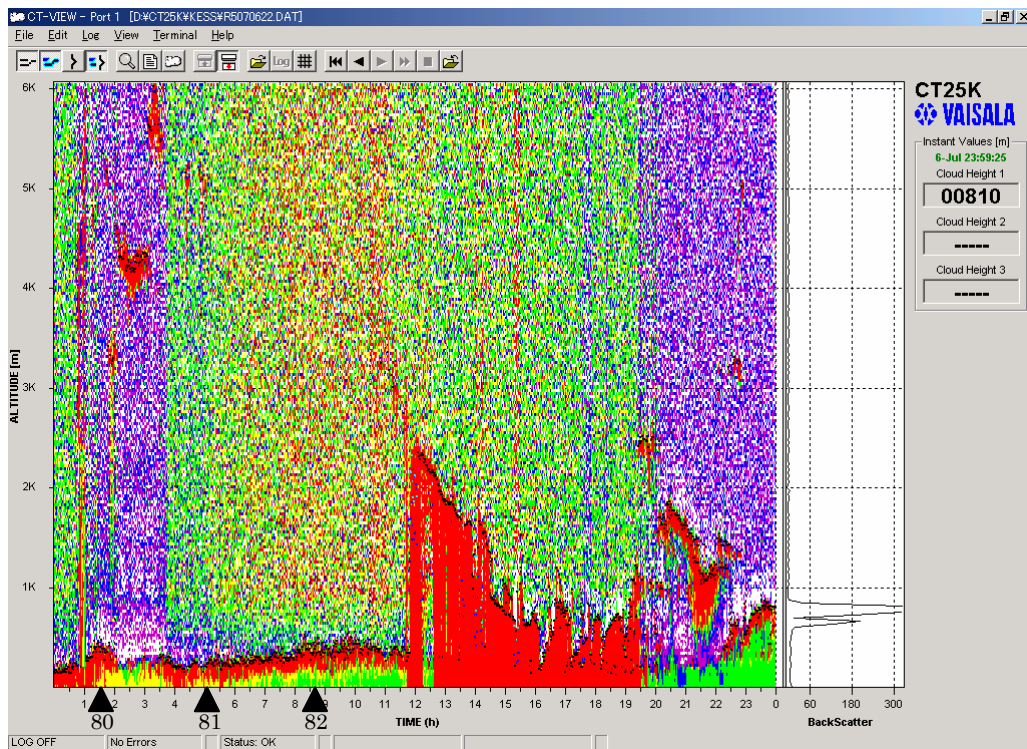
2005/07/04



2005/07/05

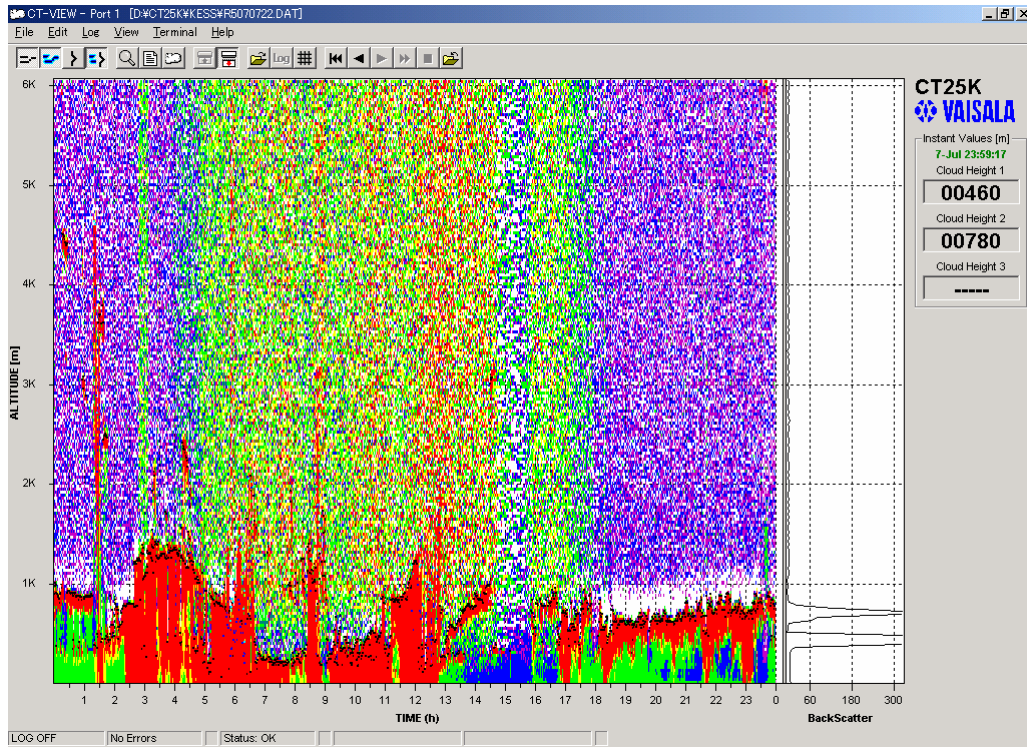


2005/07/06

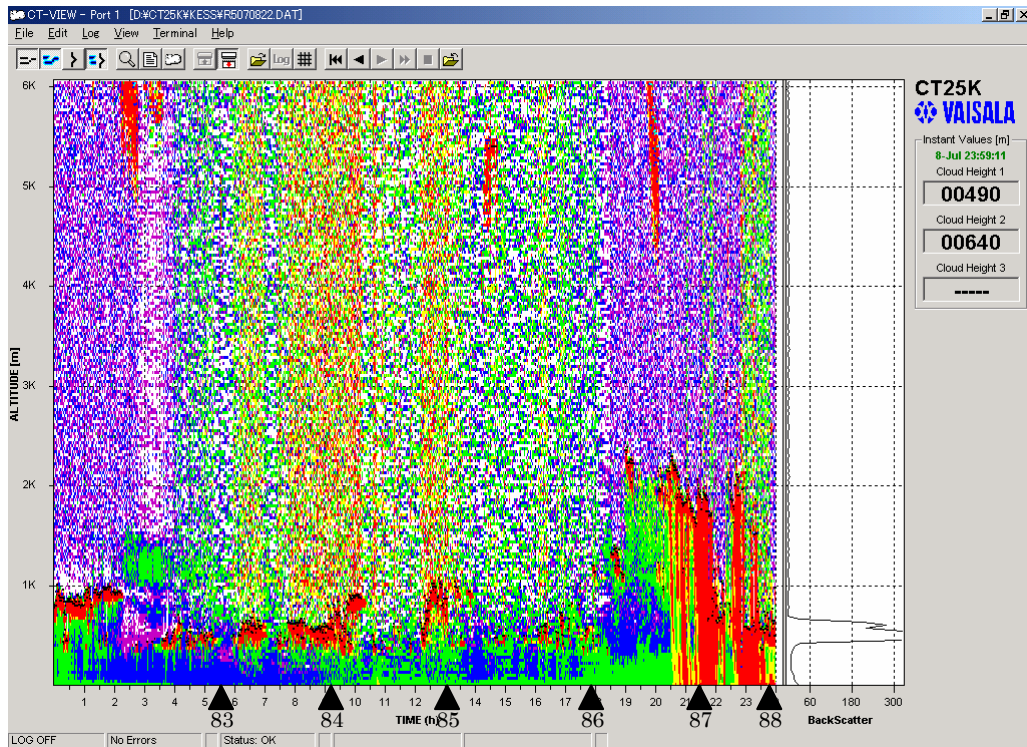




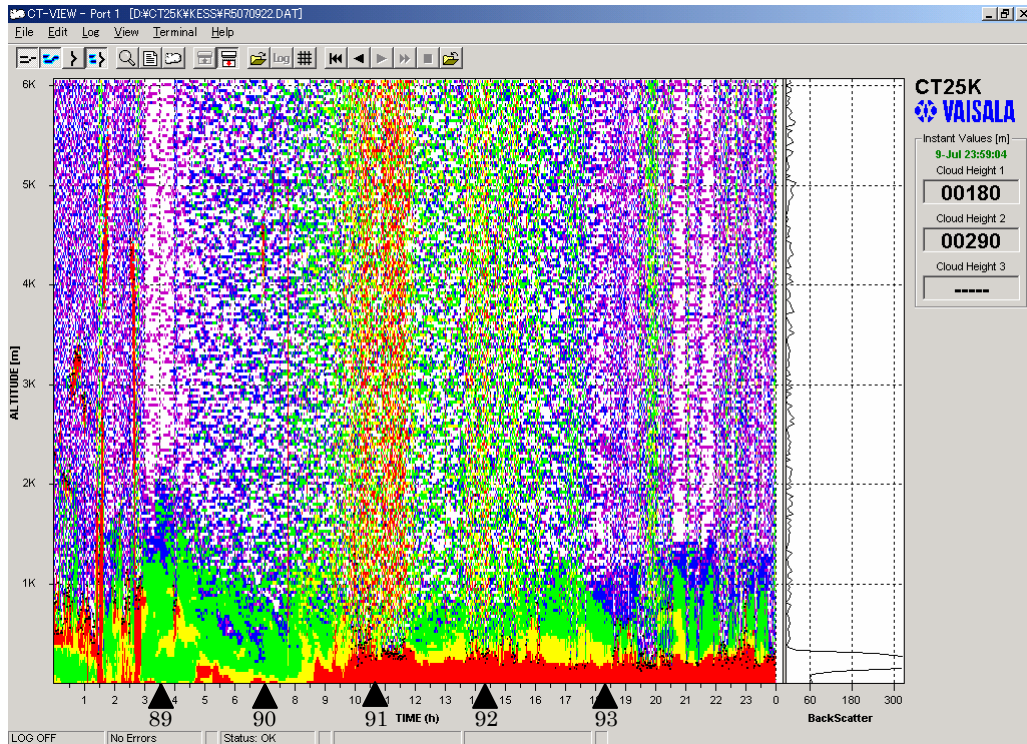
2005/07/07



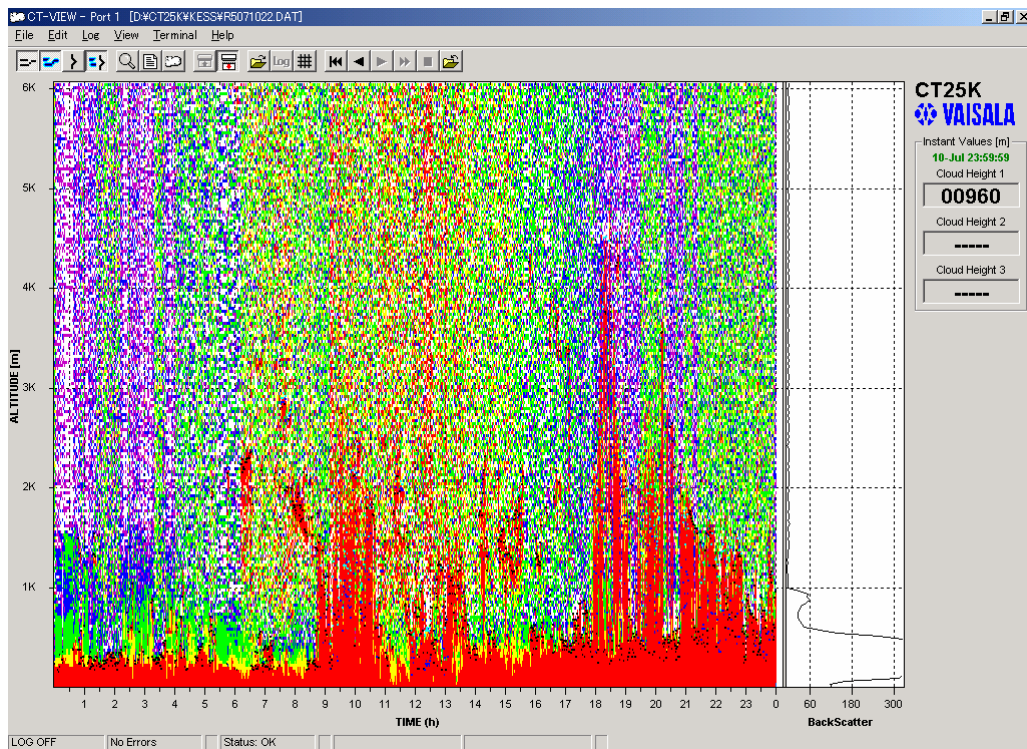
2005/07/08



2005/07/09

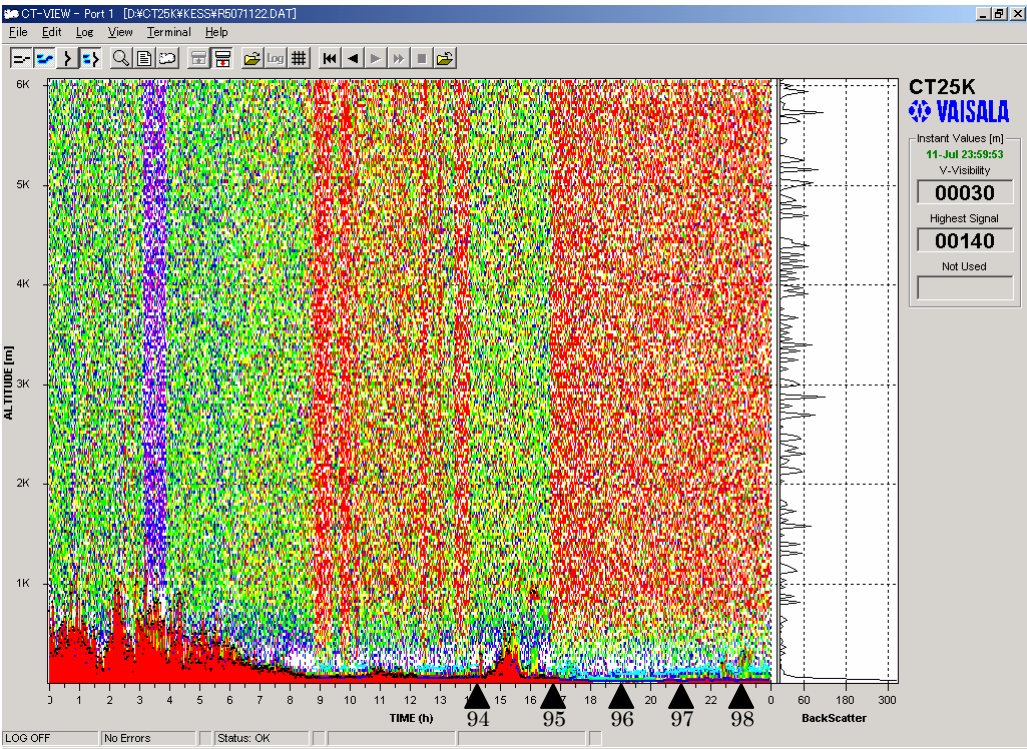


2005/07/10

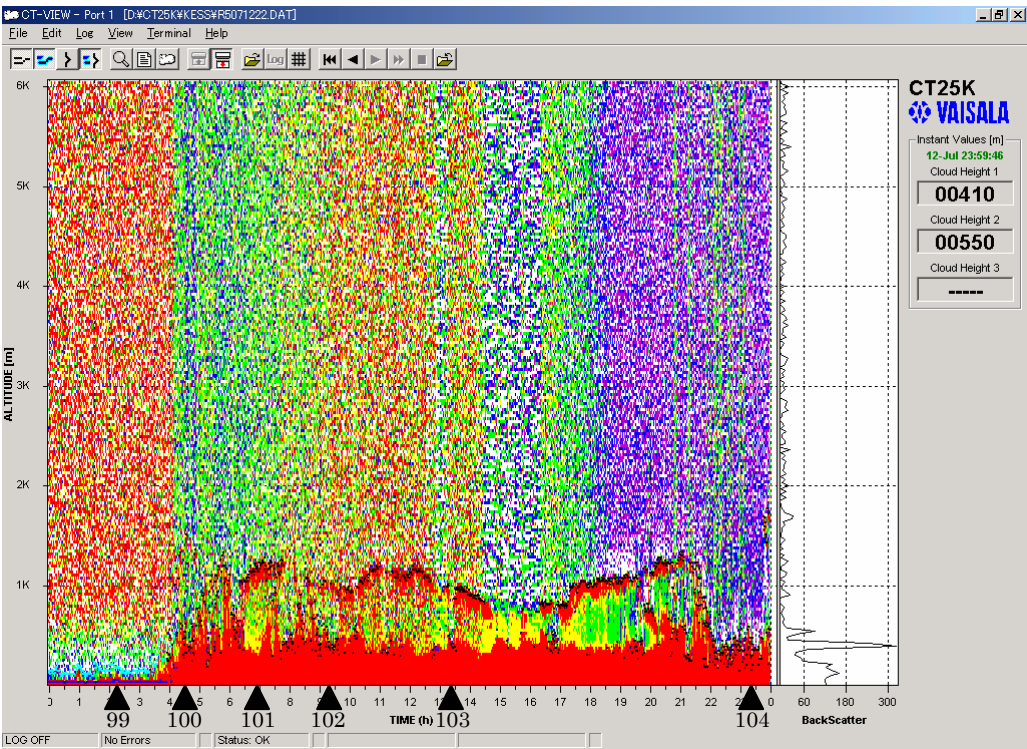




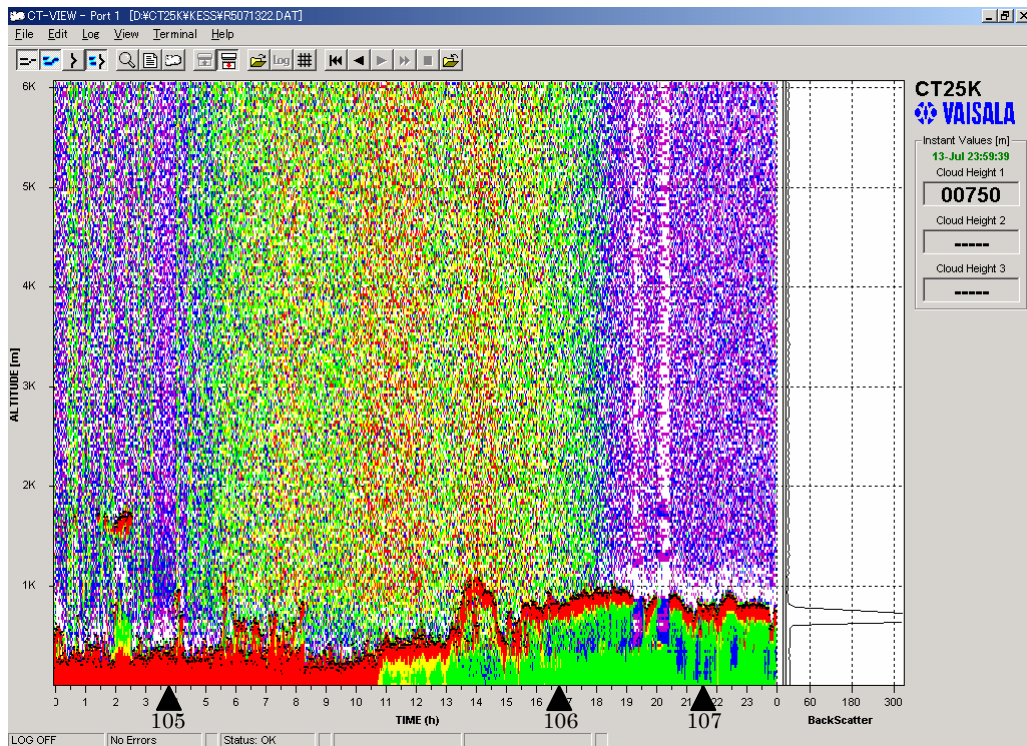
2005/07/11



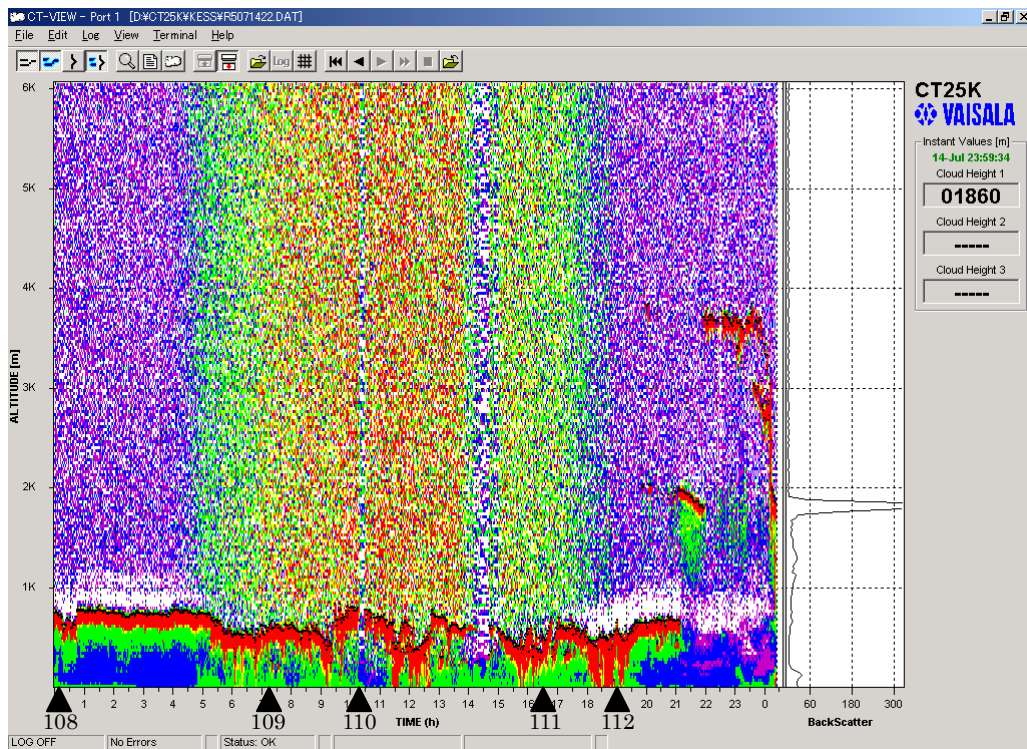
2005/07/12



2005/07/13

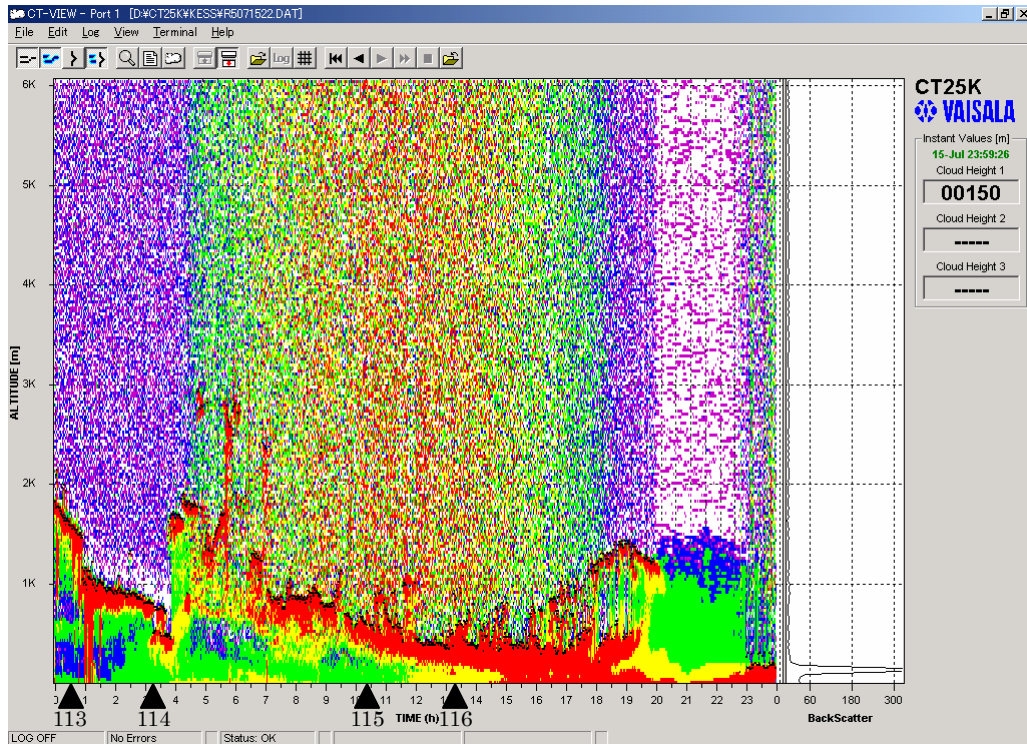


2005/07/14

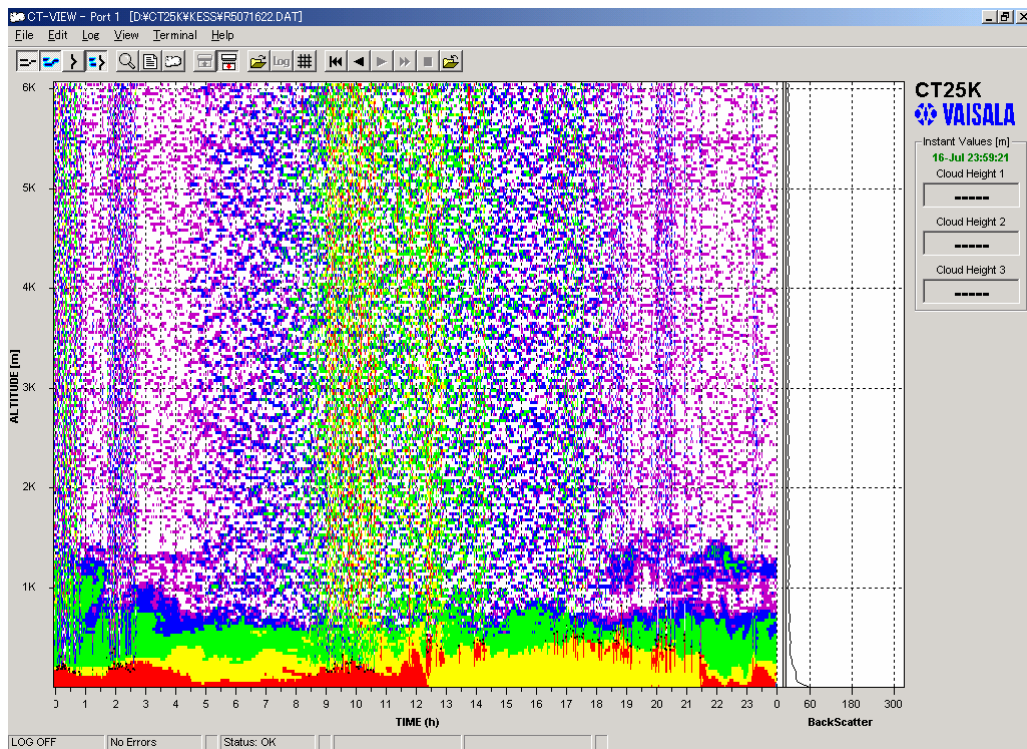




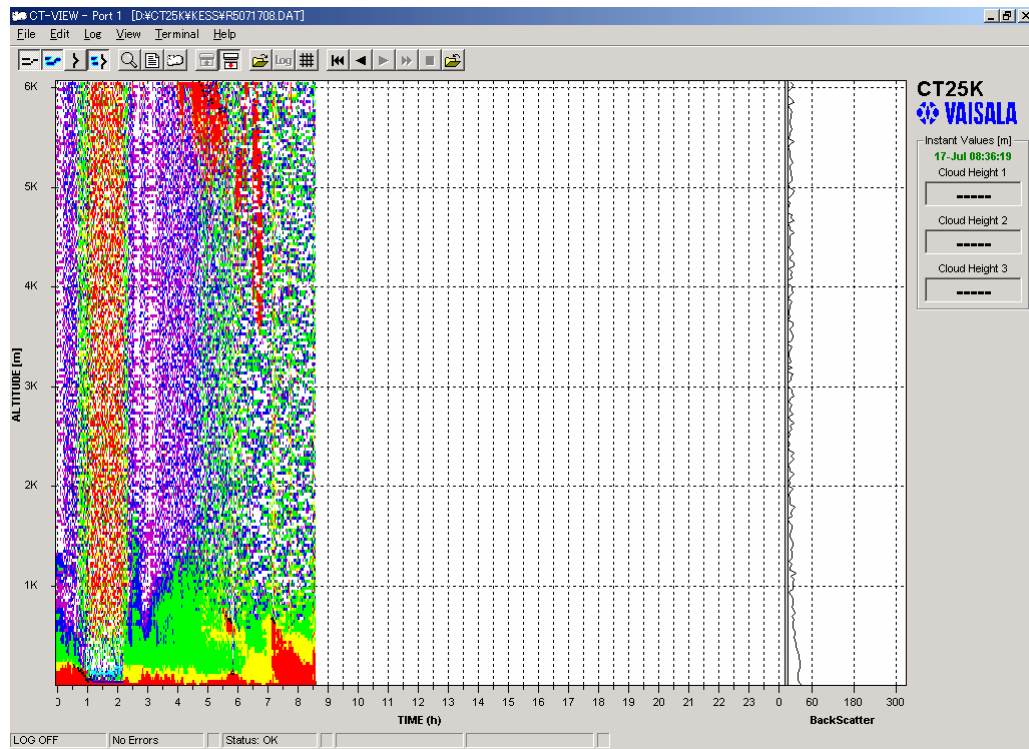
2005/07/15



2005/07/16



2005/07/17





## 4 章 雲底高度の解析結果

### 4-1 観測期間の雲底高度の傾向

3 章で述べた閾値法による雲底高度 `thres_cb1` と `thres_cb2` を、Bs データからプログラムで処理することで高度 3 km まで求めた。また、観測船 R/V Roger Revelle で計測された海上気象データの温度、露点温度データから持ち上げ凝結点高度 LCL を計算して求めた。観測期間全体における cb 及び `thres_cb`、LCL の時系列変化を以下に示す。

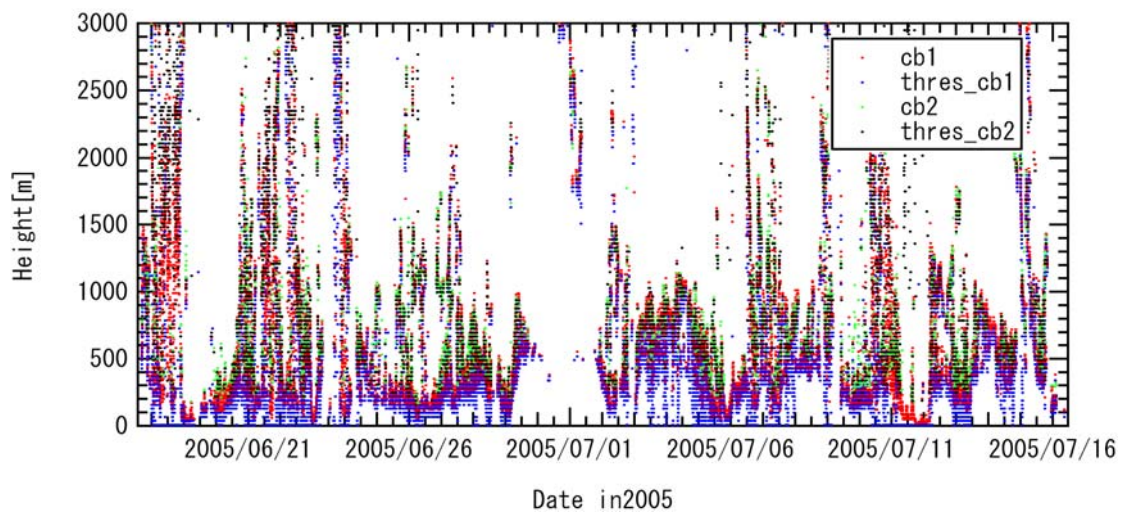


図 4-1 KESS2005 における雲底高度の時系列変化

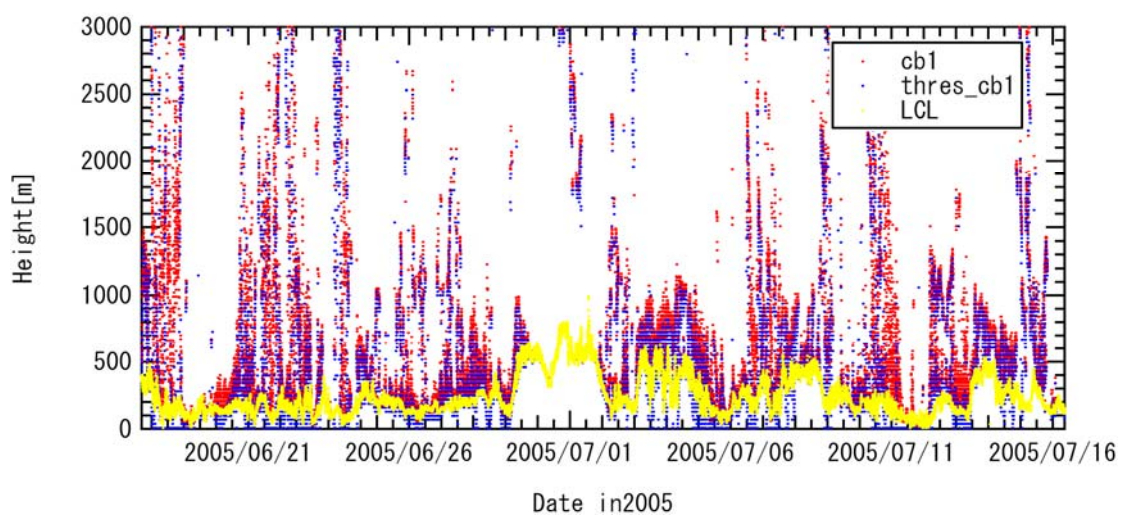


図 4-2 最下層雲底高度と LCL の時系列変化

図 4-1 において、縦軸は高度 [km] を、横軸は日付を表している。図 4-1 における各プロットは、1 層目の雲と 2 層目の雲の高度を表している。図 4-1 より、観測期間全体の傾向として、よく雲の判別がなされていたことがわかる。傾向として、雲底判別は高度 1 km 以下に集中していることが多く、全体として雲は低い高度に現れていたといえる。また、6/29~7/1 においては、cb、thres\_cb とともに雲底があまり検出されていない期間があるが、雲が観測されないことが多い。すなわちこの期間では晴れていたということを示している。(3 章 3-4 参照)。

図 4-2 では、cb1, thres\_cb1 及び LCL の時系列変化を示している。図 4-2 より、観測期間を通して LCL の高度は、高度 1 km を超えることがなかったが、シーロメーターによる cb1、thres\_cb1 との傾向は良く一致している。LCL の計算に用いた AT 及び  $T_d$  は、5 章で図 5-1、図 5-2 として海上気象データとして掲載している。

最後に、観測期間における Bs 値の挙動を表す図 4-3 に示す。

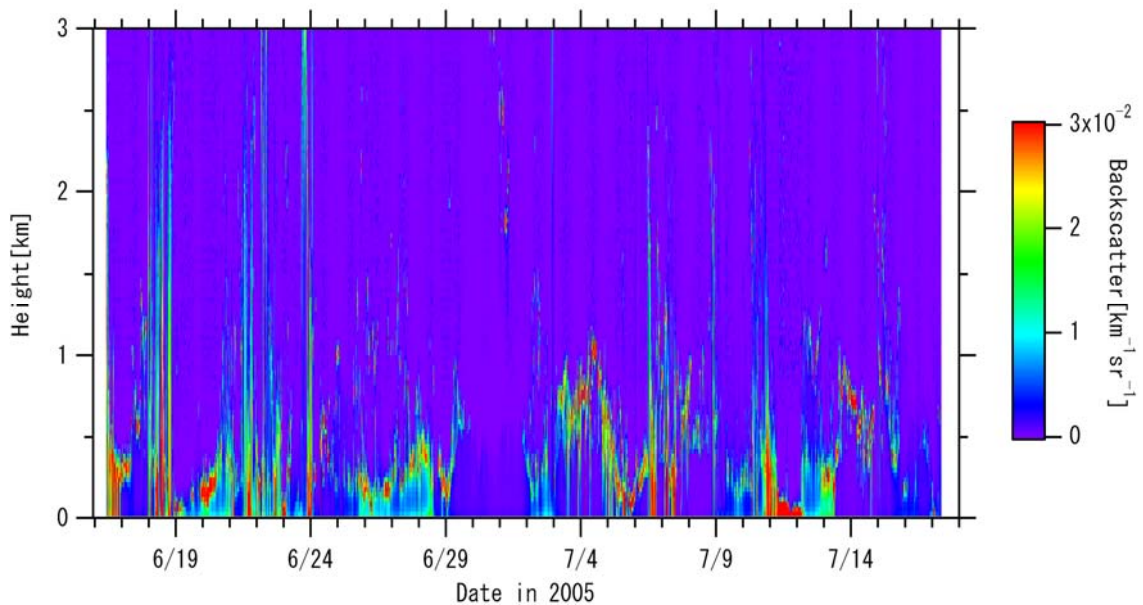


図 4-3 観測期間における 10 分平均した Bs 値の高度時間断面図

#### 4-2 判別方法による雲底高度の違い

KESS2005 において、雲底判別方法の異なる  $cb$  と  $thres\_cb$  の高度差の比較を以下に示す。

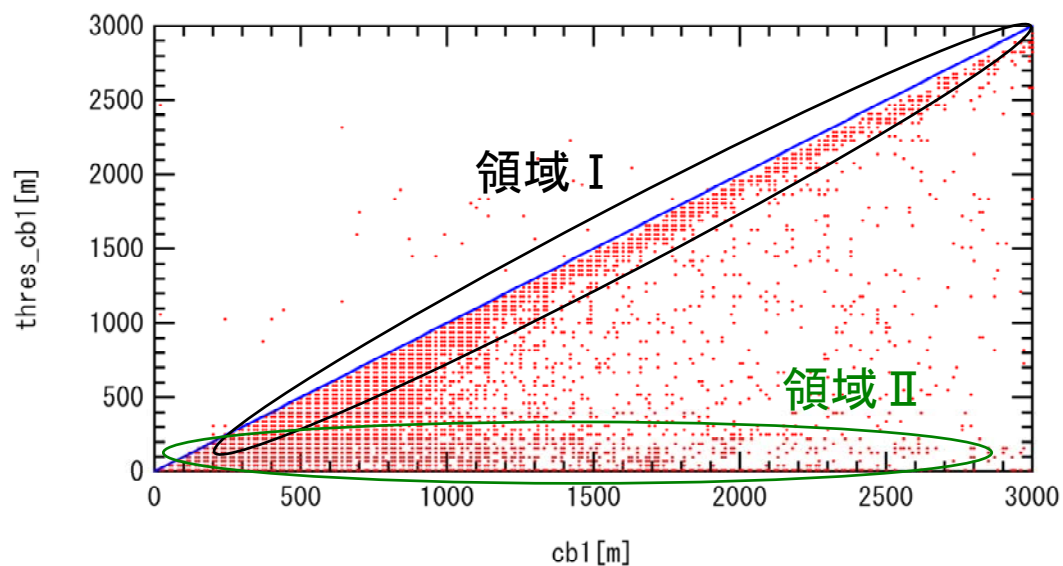


図 4-4  $cb1$  と  $thres\_cb1$  の散布図

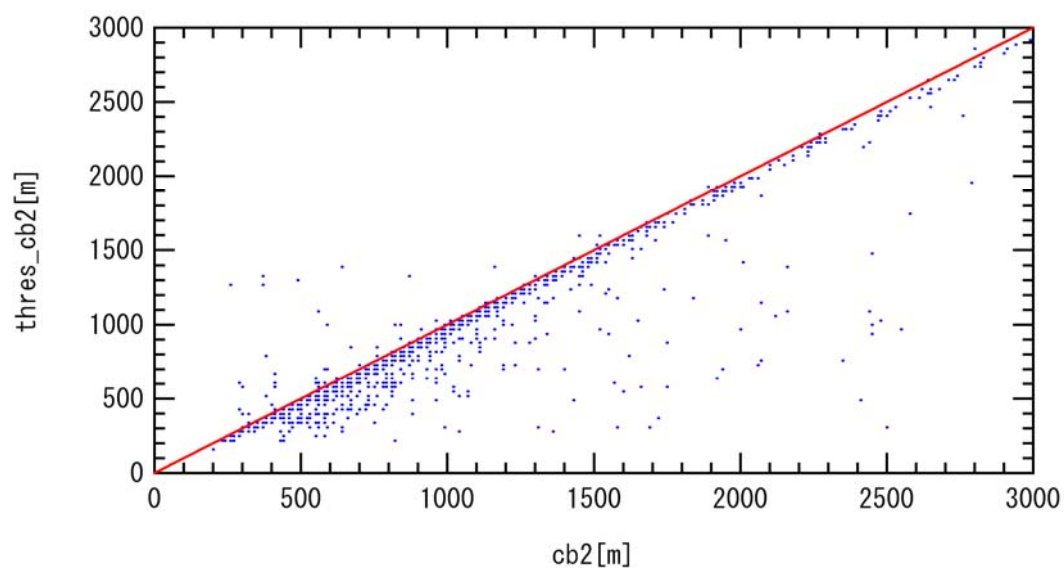


図 4-5  $cb2$  と  $thres\_cb2$  の散布図

図 4-4 は、横軸が **cb1** の高度を表し、縦軸が同じデータで検出された **thres\_cb1** の高度を表している。図 4-4 により、観測期間全体でほぼ  $cb1 \geq thres\_cb1$  であったことがわかる。これは、3-3 で述べた雲底検出のアルゴリズムの相違から期待される。また、差異の生じている高度域は、**thres\_cb1** が 1 km よりも高い高度ではあまり見られず、1 km 以下の低い高度に集中しているように見える。

図 4-5 では、2 層目の雲について図 4-4 と同様に示している。図 4-4 と比較すると、1 層目の雲より、2 層目の方が明らかに差異が少なくなっていることがわかる。

図 4-4、4-5 で見られる傾向をまとめると、**thres\_cb1** 雲底高度が 1 km より高い方が差異が小さく、逆に **cb1** が 1 km 以下では **thres\_cb1** が 300 m 以下に留まることがある。判別方法の違いによる雲底高度の差違が生じていない場合（領域Ⅰ）と生じている場合（領域Ⅱ）とで気象データプロファイルにはどのような違いがあるのか、を調べることをラジオゾンデデータとの比較を行う上でのひとつの指針とした。

## 5 章 海上気象データと第一雲底高度の関係

この章では、KESS2005 で見られた、海上気象データと雲底高度の関係について述べる。海上気象データとシーロメーターで観測された雲底高度との比較については、本研究室では何度か行われている<sup>6,7)</sup>。今までに海上相対湿度と最下層雲底高度の相関関係が見い出されている。また、雲底高度と海上面温度(SST)と海上気温(AT)の差にも相関が見られている。

まず、KESS2005 における海上気象の時系列データを示し、次に各海上気象データと 1 層目の雲底高度の散布図を示す。

海上気象データの記号と単位を以下に示す。

- ・ 気温 AT [degC]
- ・ 海水温度 SST [degC]
- ・ 露点温度 T<sub>d</sub> [degC]
- ・ 気圧 Press [hPa]
- ・ 相対湿度 RH [%]

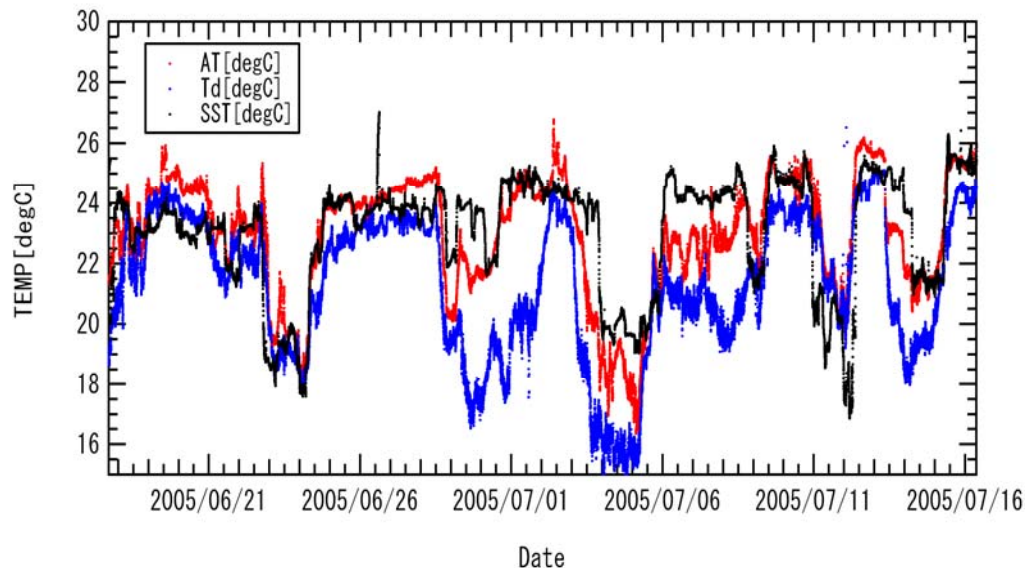


図 5-1 KESS2005 における海上各種温度の時系列変化



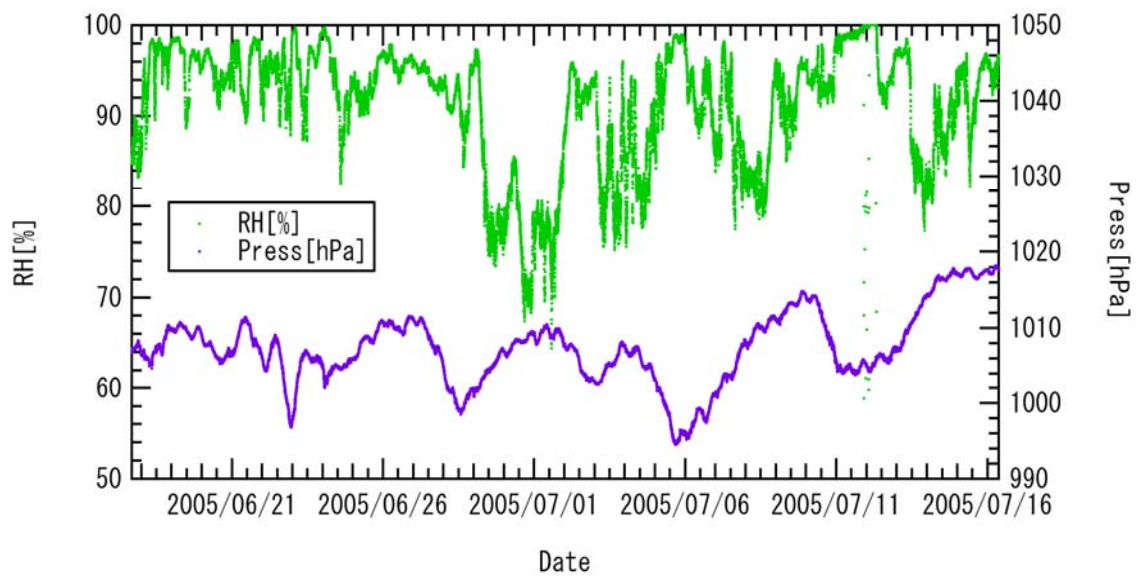


図 5-2 海上相対湿度 [%]と海上気圧 [hPa]の時系列変化

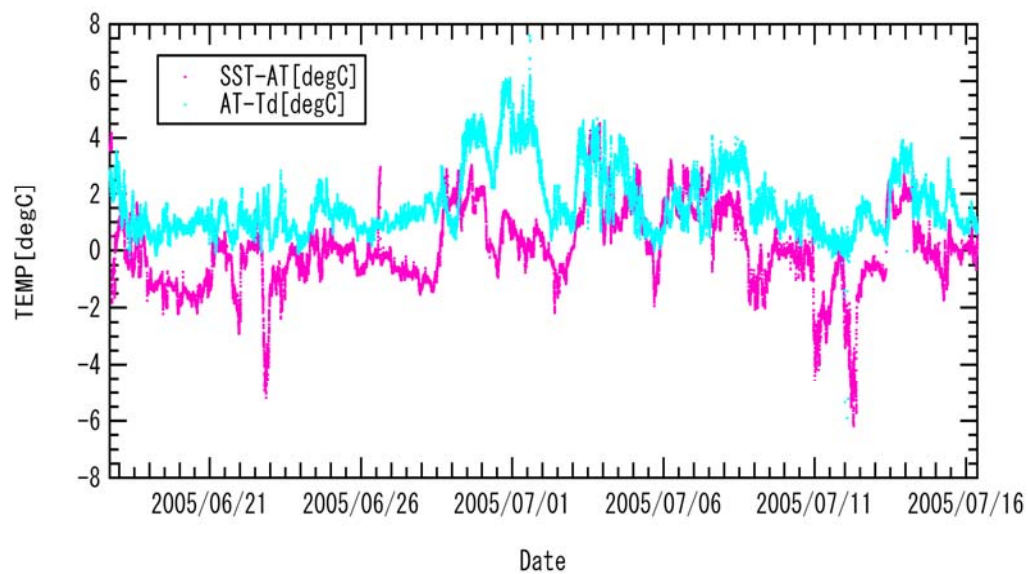


図 5-3 SST-AT [degC]と AT-T<sub>d</sub> [degC]の時系列変化

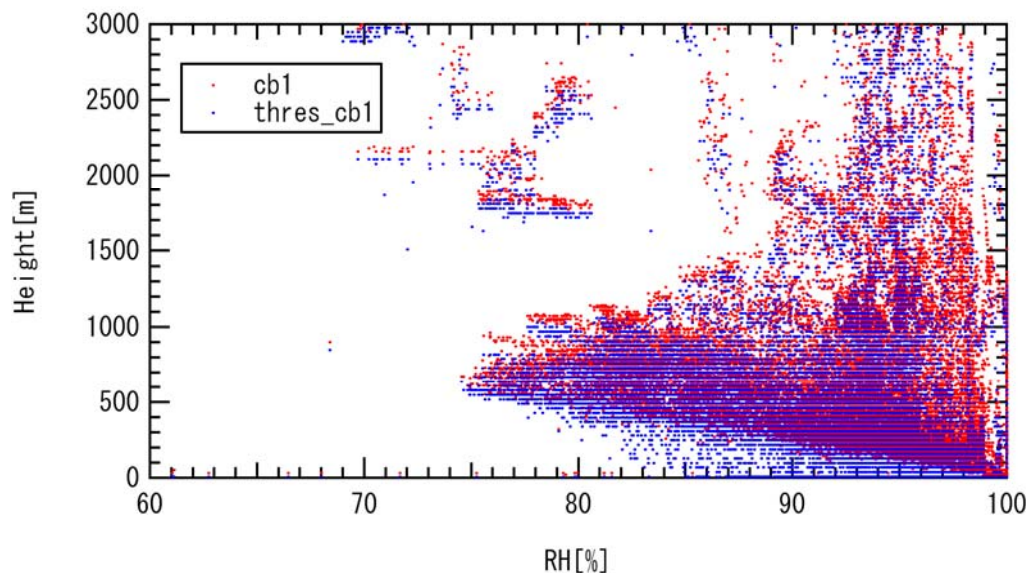


図 5-4 海上相対湿度に対する第一雲底高度

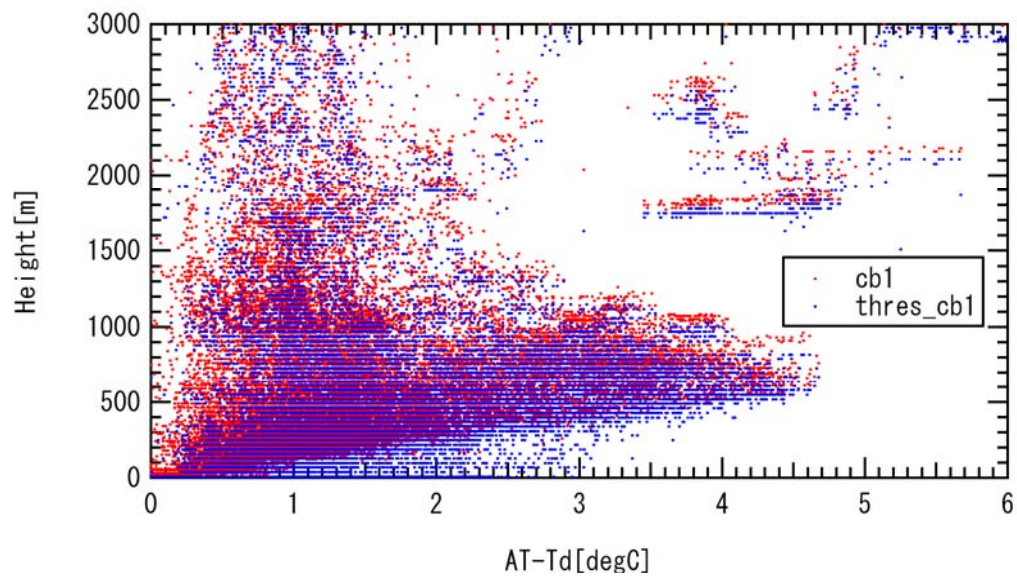


図 5-5 AT-T<sub>d</sub>に対する第一雲底高度

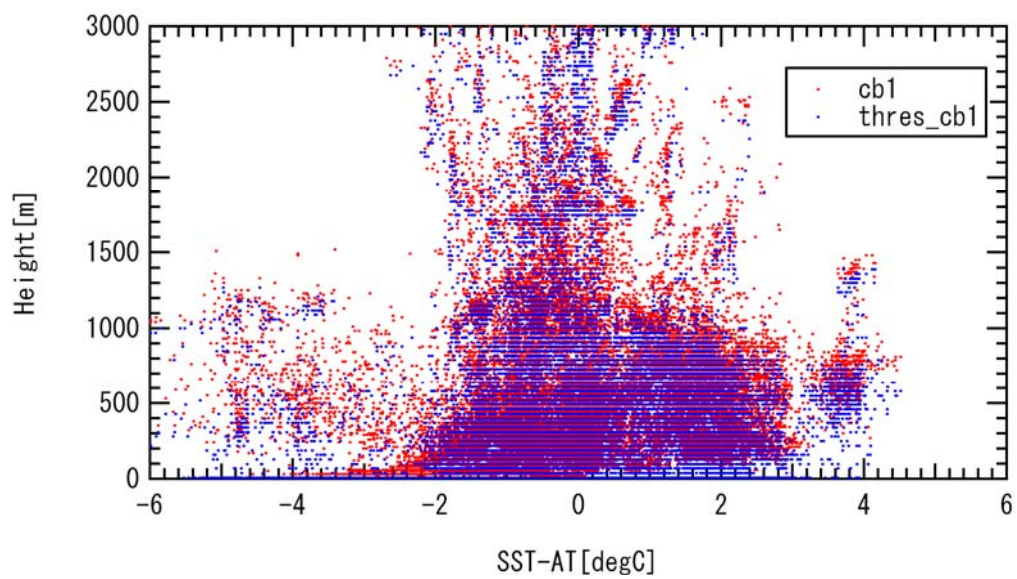


図 5-6 SST-AT に対する第一雲底高度

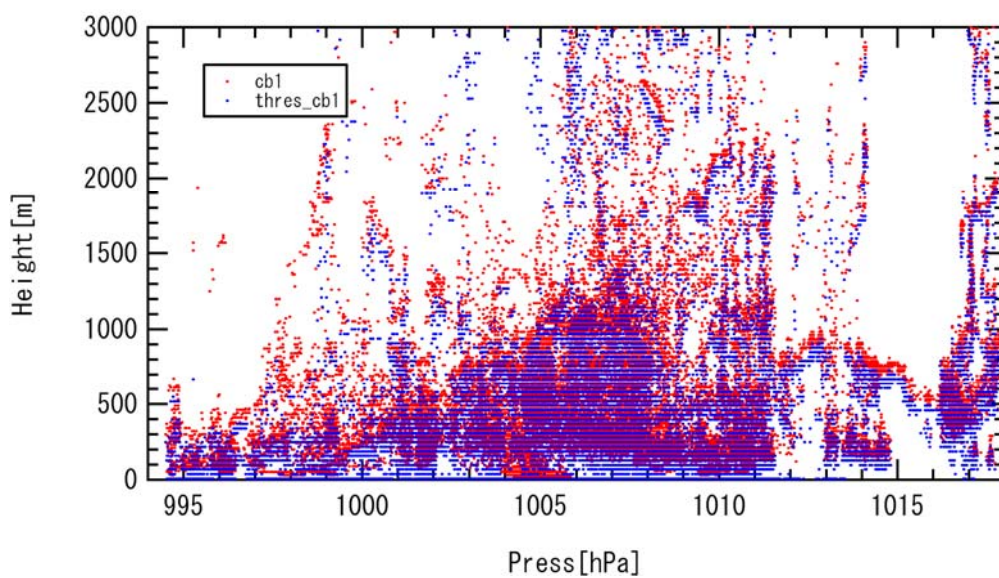


図 5-7 海上気圧に対する第一雲底高度



図 5-1 から図 5-3 は、観測期間に対する各海上気象データの変化を表している。

図 5-4 から図 5-7 は、観測期間全体においての各海上気象データ対雲底高度 `cb1` 及び `thres_cb1` の散布図を表している。

図 5-4 では、第一雲底高度が、相対湿度の値に対応して変化していることがはっきりとわかる。 $RH$  が高いときに雲底高度は低く、逆に  $RH$  が低いときには雲底高度は高くなっている。すなわち、負の相関関係があるといえる。また、海上面付近での  $RH$  が 90% を越えるような場合においては、雲底高度判別の頻度を考えると、低層域に限らず、高度 1 km 以上にできる雲も多くの観測がなされていることがわかる。

図 5-5 では、海上面での気温と海上面での露点温度の差があるときとないときでは、雲底高度に差が現れるのかということを表している。 $AT$  が  $T_d$  に近ければ低層域での雲底高度は低く、 $AT$  が  $T_d$  と差があれば、雲底高度は高い。つまり、 $AT-T_d$  と雲底高度変化には正の相関が見られる。また、雲の発生の頻度自体にも影響があり、 $AT$  と  $T_d$  に差が無いほど雲の発生頻度は多かった。 $AT-T_d$  は  $RH$  と関連づけられるため図 5-4 と図 5-5 はミラーのような関係にあることが見てとれる。図 5-4、図 5-5 に見られる相関関係は今までの研究結果と一致する。

図 5-6 では、海上面での気温と海水温度の差による雲底高度への影響を表している。 $SST-AT$  の差が大きいときには、下層域での雲底高度は高くなっているようである。 $SST$  が  $AT$  よりも高く、差が大きいときは大氣的に不安定であり、対流が起こっていると考えられる。ただし、 $SST-AT$  は、 $RH$  や  $AT-T_d$  との場合に比べるとはっきりとした相関関係はみられない。

図 5-7 では、海上面気圧に対する雲底高度変化を表しているが、明瞭な相関関係はないようである。

## 6章 ラジオゾンデデータとの比較

### 6-1 ラジオゾンデとシーロメーターのデータ

KESS2005 において、ラジオゾンデによる大気観測は計 116 回のデータ取得に成功しており、その間、シーロメーターによる雲底高度判別がなされたデータは合計 89 個存在していた。雲の発生による大気に対する影響を考えるため、ラジオゾンデによって得られた各気象データと、シーロメーターにより得られた Bs の変動を比較したグラフを作成した。

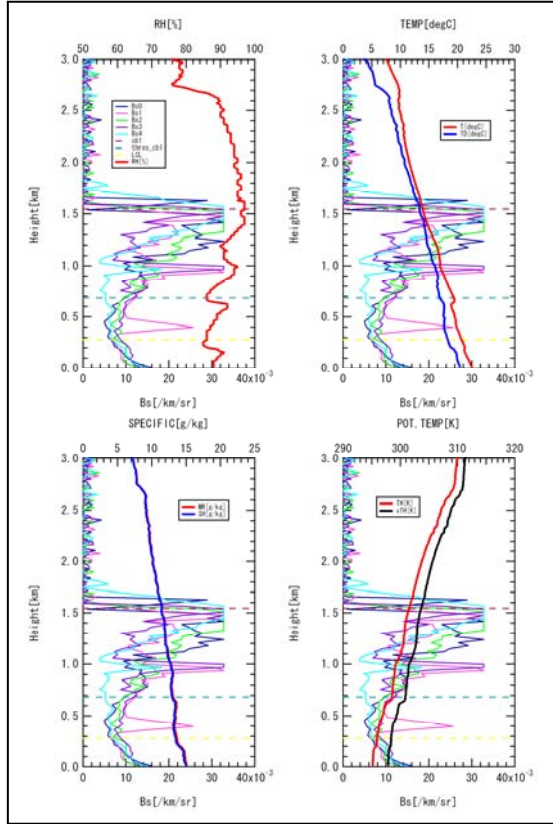
ラジオゾンデの放球番号と放球位置に関しては、図 2-2 を参照していただきたい。また、ラジオゾンデの上昇速度は、約 3 [min/km]であった。このラジオゾンデデータの上昇速度と、図 4-1 でみられるように雲底高度が、殆どの場合において 1 km 以下に集中しているという点から、シーロメーターによって得られた Bs データを、ラジオゾンデ放球時刻から 4 分間後までの 5 データ分を比較することとした。また、次に示すグラフ中における cb1、thres\_cb1 は、5 データ分の Bs データによって判別された雲底高度に差が無い場合は、平均値をとっており、5 データのうち、1 点のみ他に比べて異なる場合は、それを除いたときの雲底高度を平均している。5 データの全てで雲底判別高度がばらつく場合は、ある最もらしい高度を選択し掲載している。

ラジオゾンデデータの時刻は UTC で記録されており、シーロメーターデータは JST で記録されていたので  $JST = UTC + 9 [h]$  に注意した。以下では、ラジオゾンデデータの放球時刻を JST に換算して、ゾンデ番号とともに表記することにする。

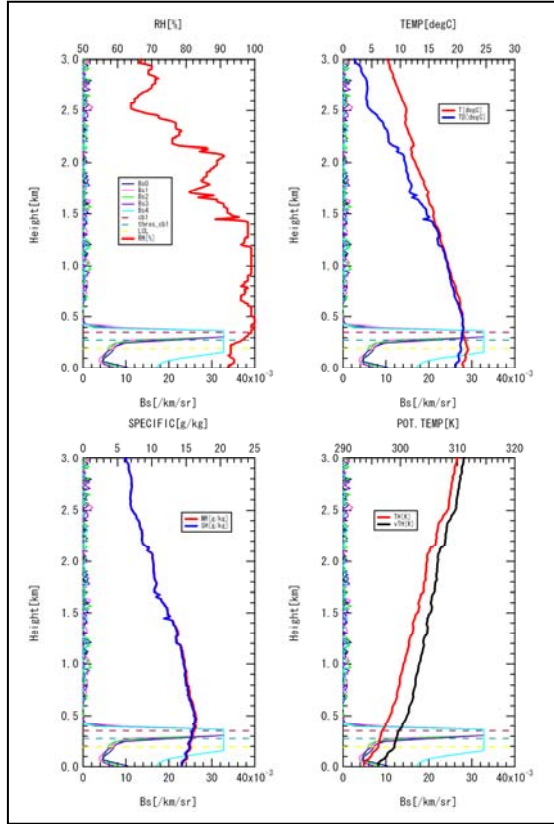
以下のグラフで凡例にある記号と気象データは以下のように対応している。

T	TEMPERATURE(deg C) , 気温
RH	RELATIVE HUMIDITY(m/s) , 相対湿度
TD	DEWPOINT TEMPERATURE(degC) , 露点温度
MR	MIXING RATIO(g/kg) , 混合比
SH	SPECIFIC HUMIDITY(g/kg) , 比湿
TH	POTENTIAL TEMPERATURE(K) , 温位
vTH	VIRTUAL POTENTIAL TEMPERATURE(K) , 仮温位

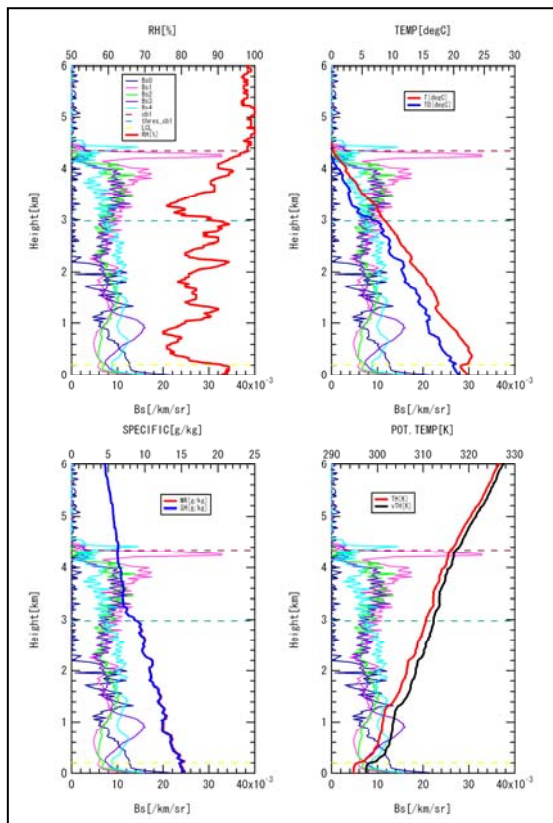
Sonde No.1 2005/6/18 9:47 (JST)



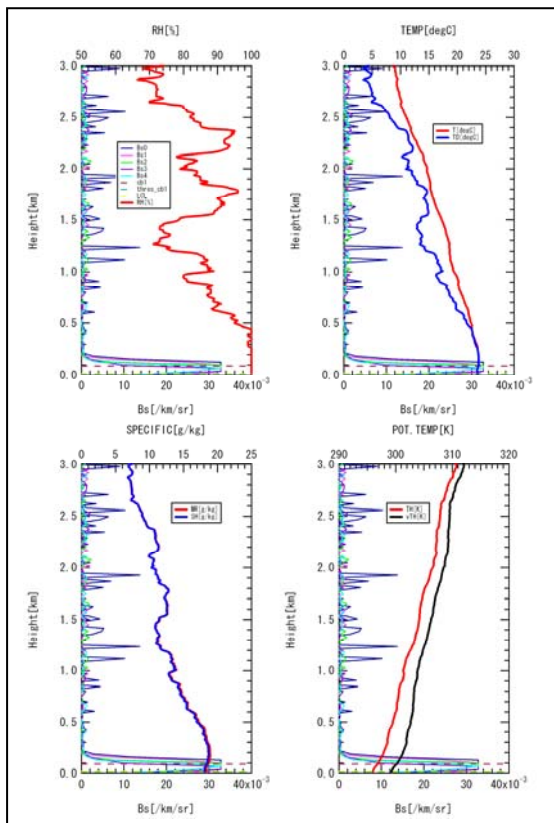
Sonde No.2 2005/6/18 14:09



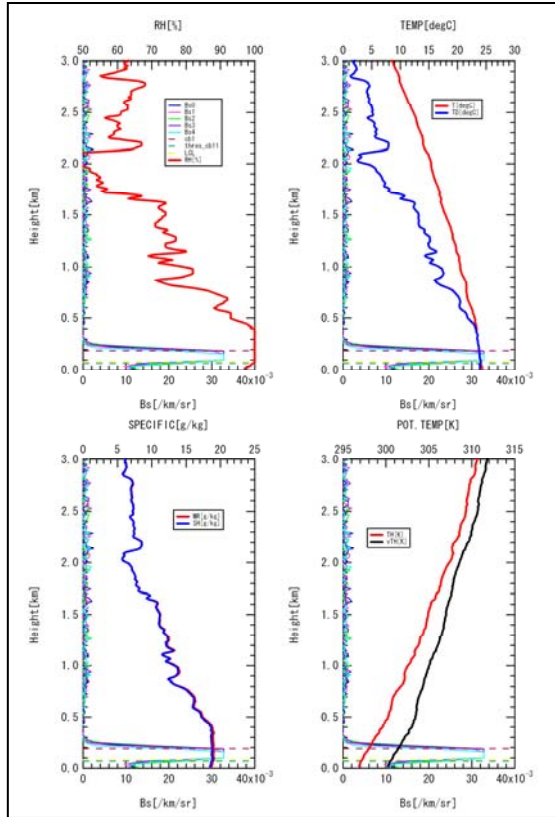
Sonde No.4 2005/6/18 19:20



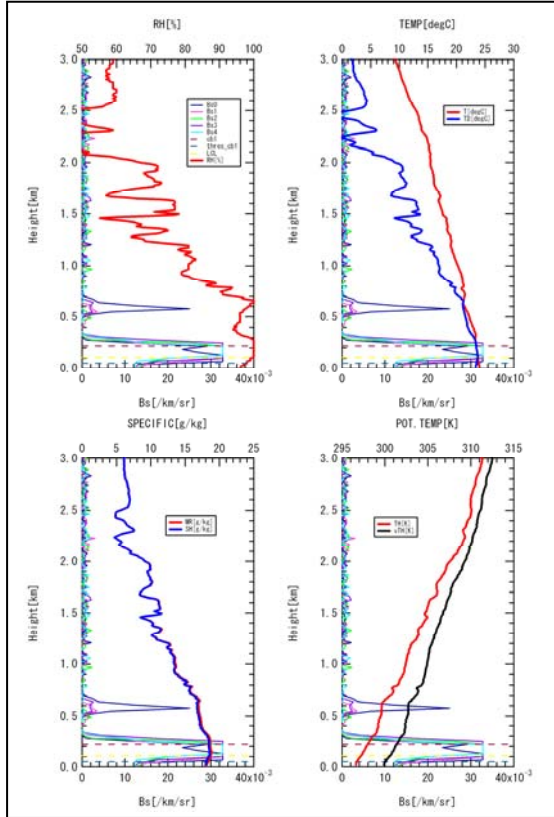
Sonde No.5 2005/6/18 22:18



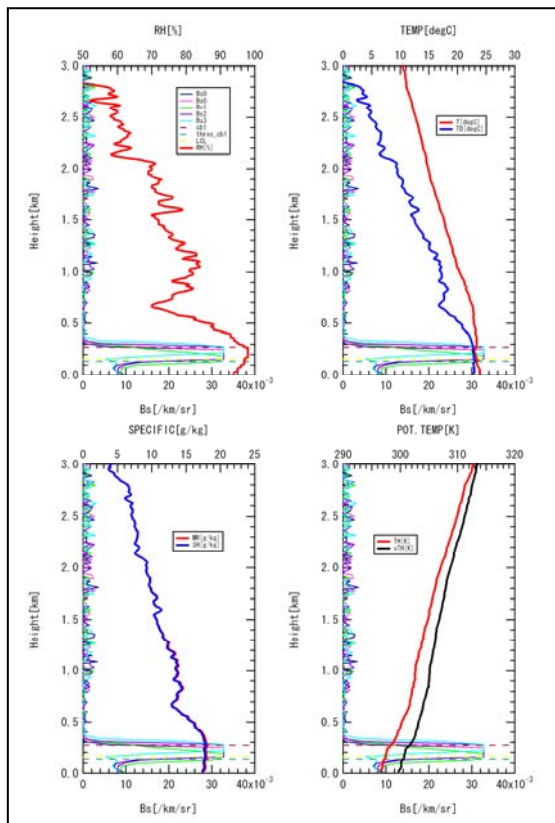
Sonde No.10 2005/6/20 0:34



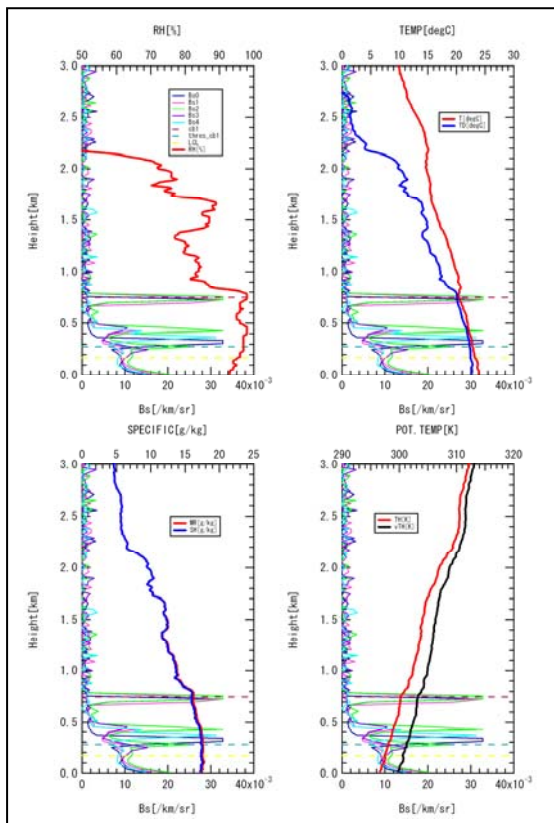
Sonde No.11 2005/6/20 3:44



Sonde No.12 2005/6/20 10:10

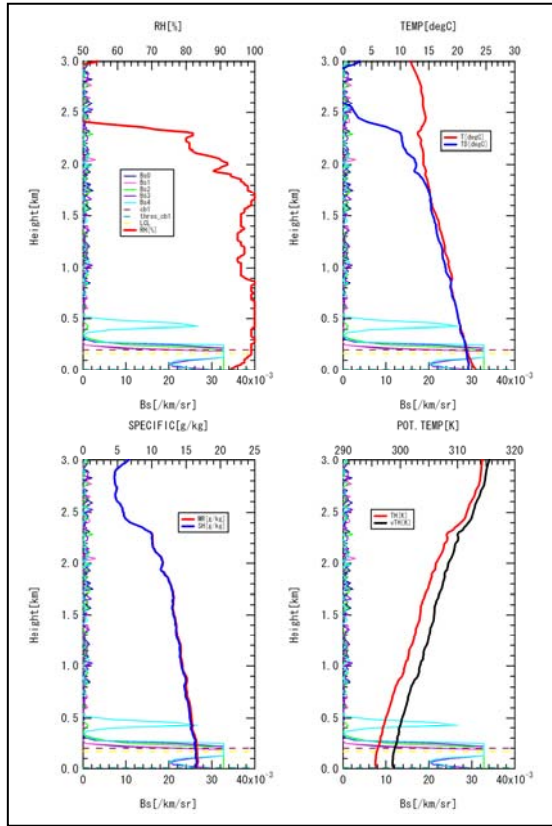


Sonde No.13 2005/6/20 15:19

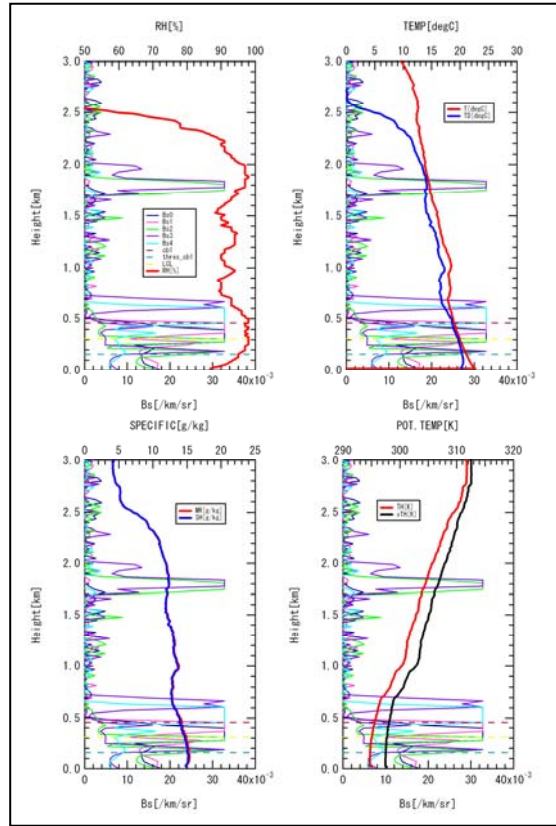




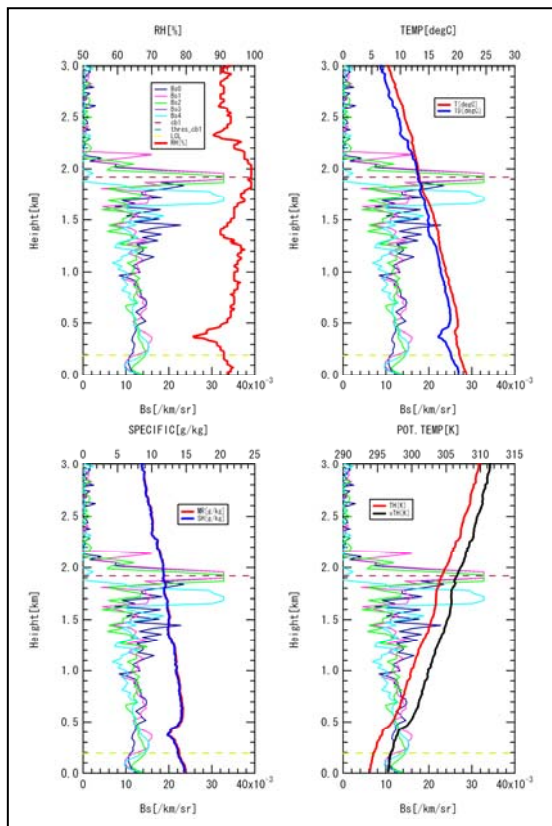
Sonde No.14 2005/6/21 2:17



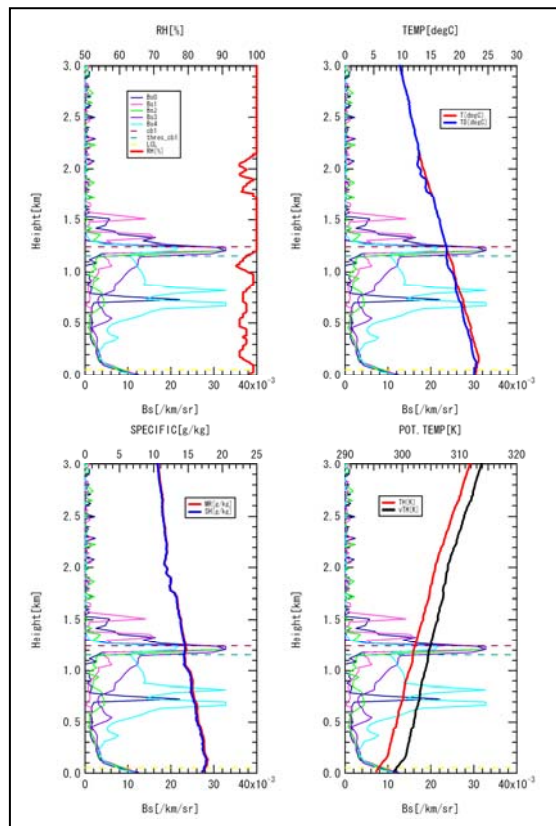
Sonde No.15 2005/6/21 11:31



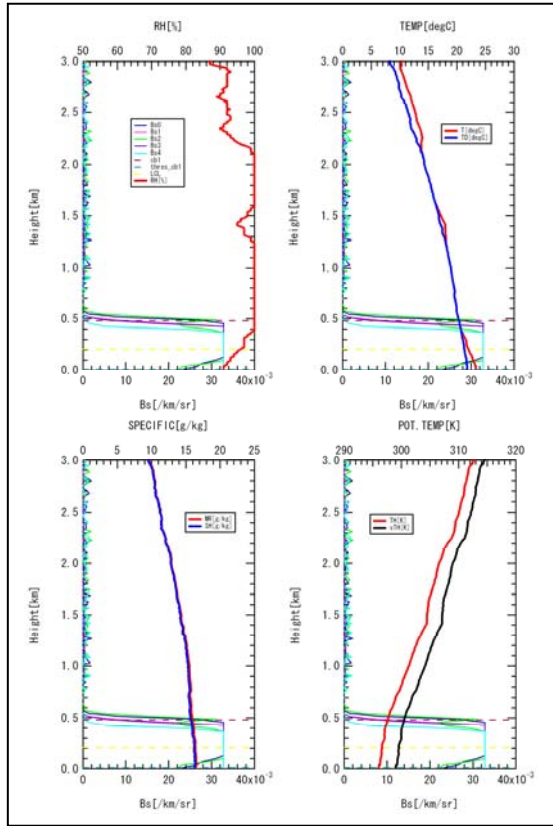
Sonde No.16 2005/6/21 13:58



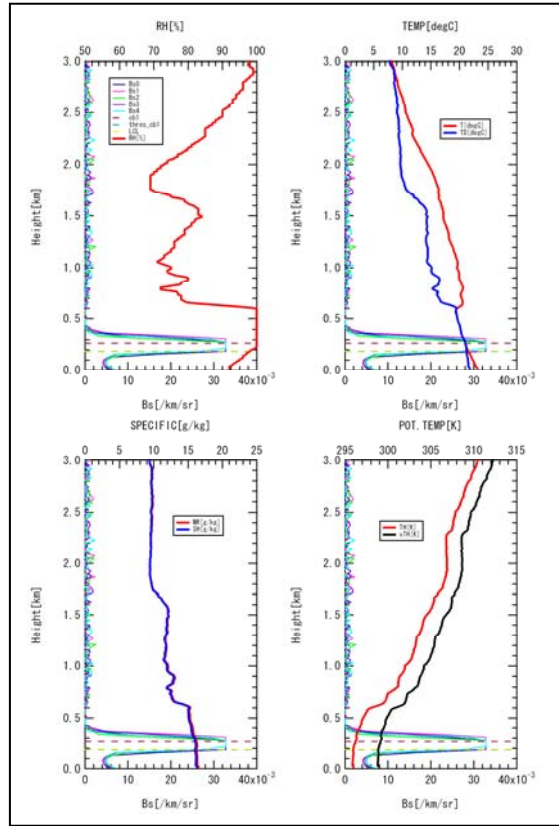
Sonde No.17 2005/6/21 20:17



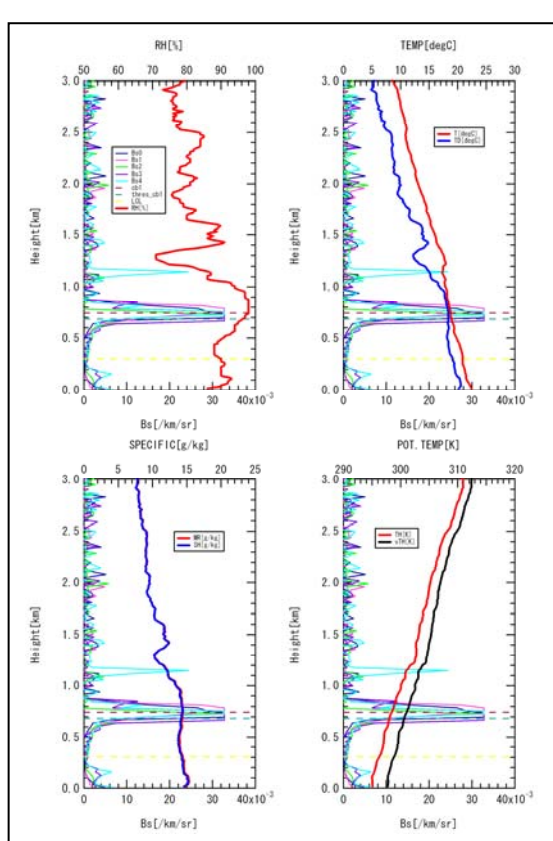
Sonde No.18 2005/6/22 0:13



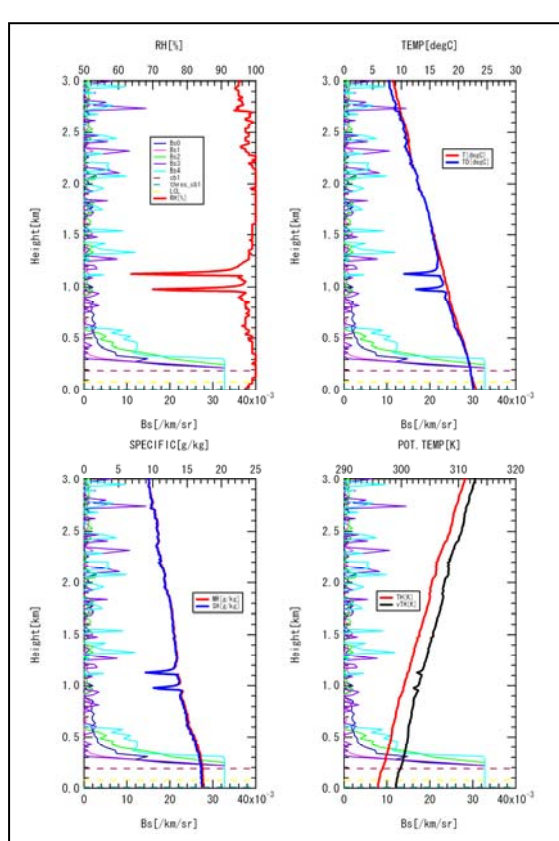
Sonde No.19 2005/6/22 4:42



Sonde No.20 2005/6/22 13:17

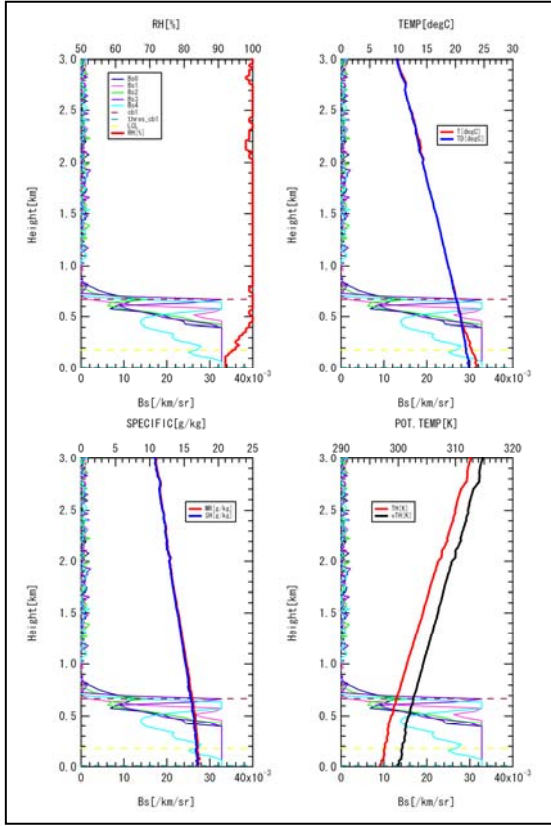


Sonde No.21 2005/6/22 16:36

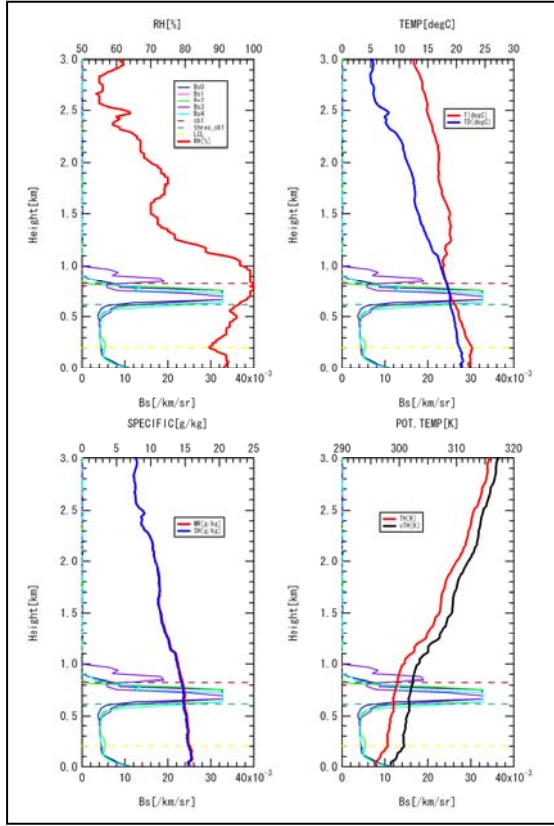




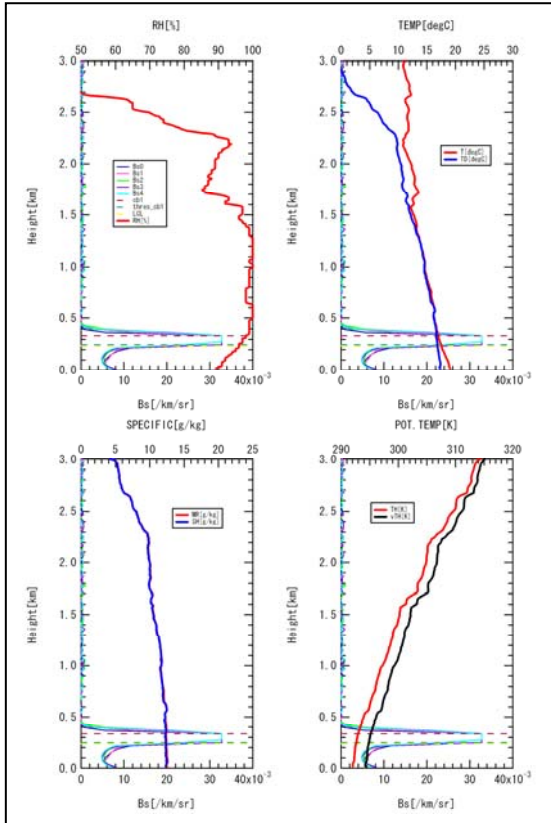
Sonde No.22 2005/6/22 19:14



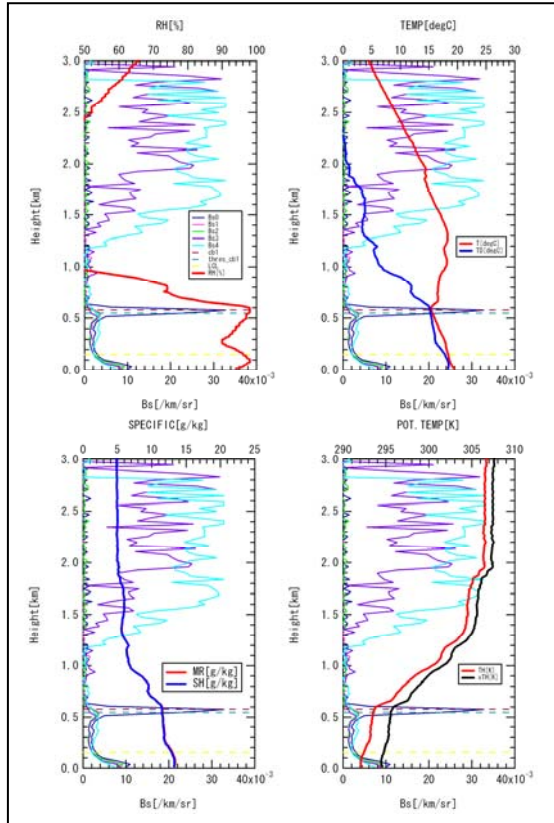
Sonde No.23 2005/6/22 22:02



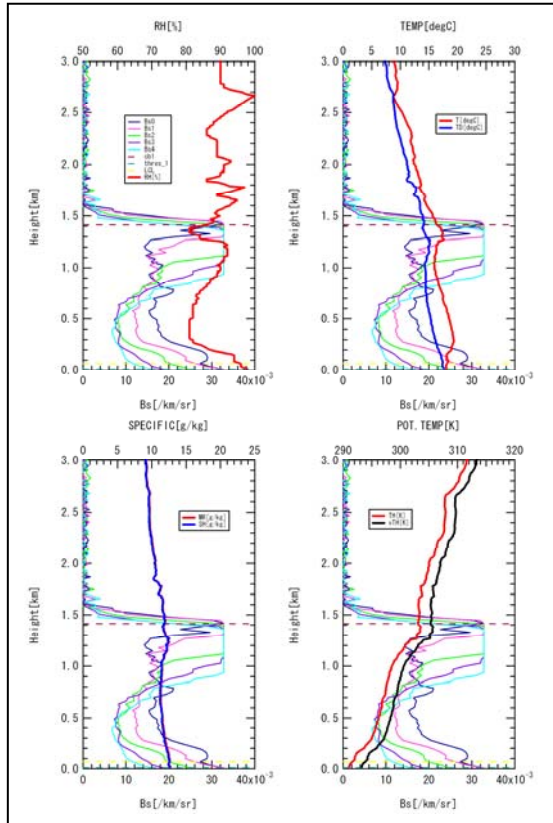
Sonde No.24 2005/6/23 4:19



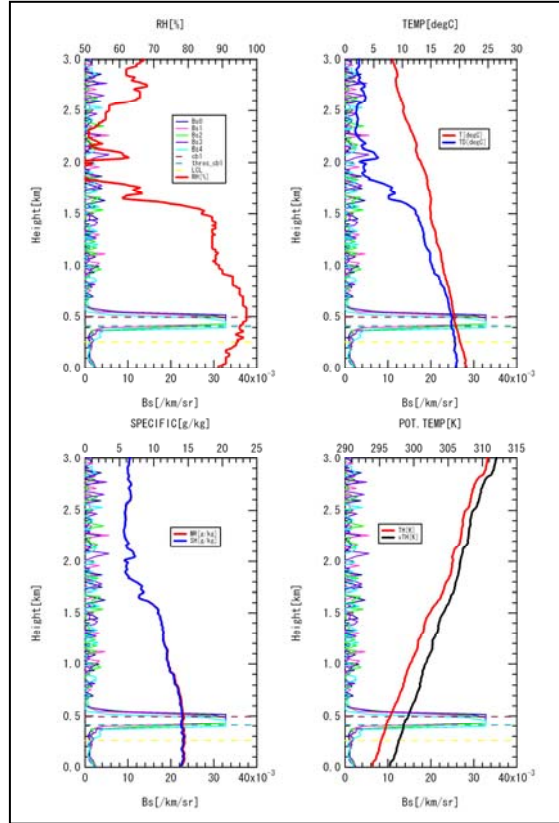
Sonde No.27 2005/6/23 16:08



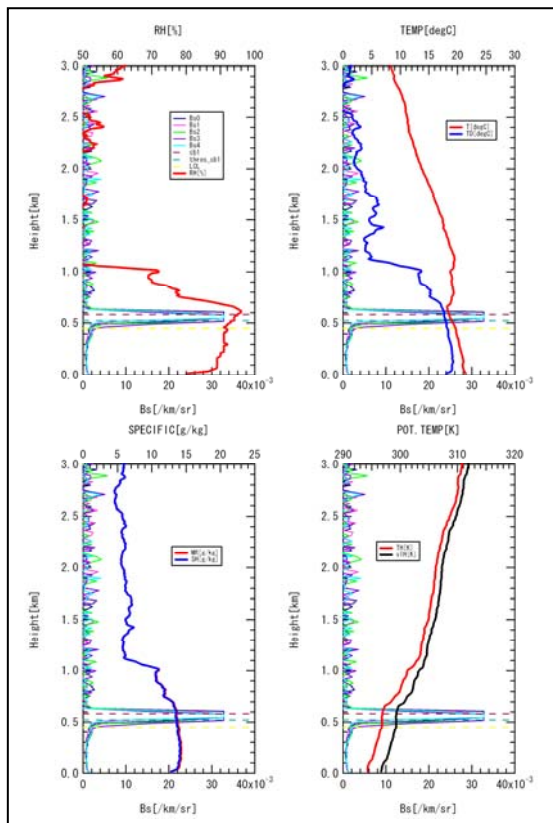
Sonde No.29 2005/6/24 1:00



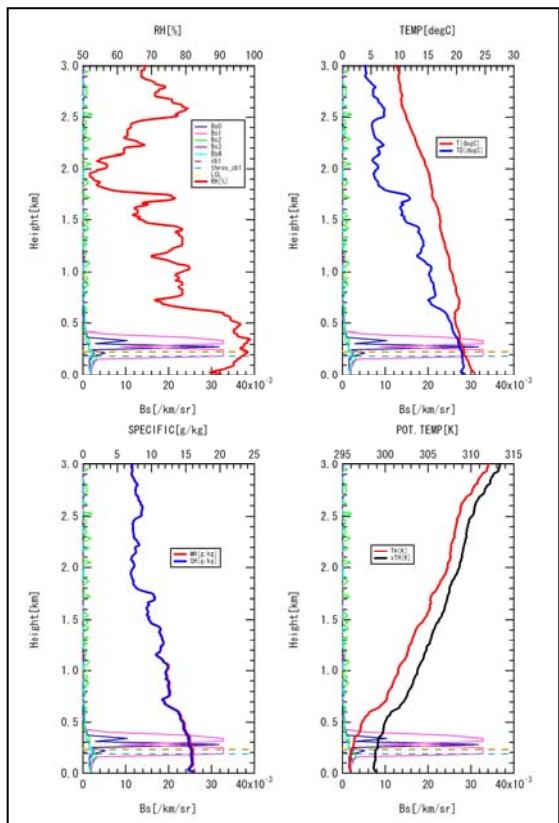
Sonde No.31 2005/6/24 10:14



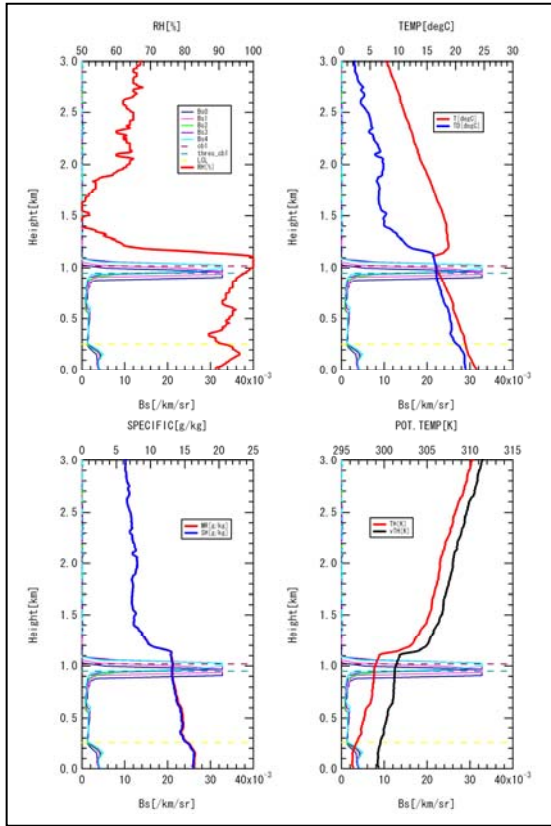
Sonde No.32 2005/6/24 14:31



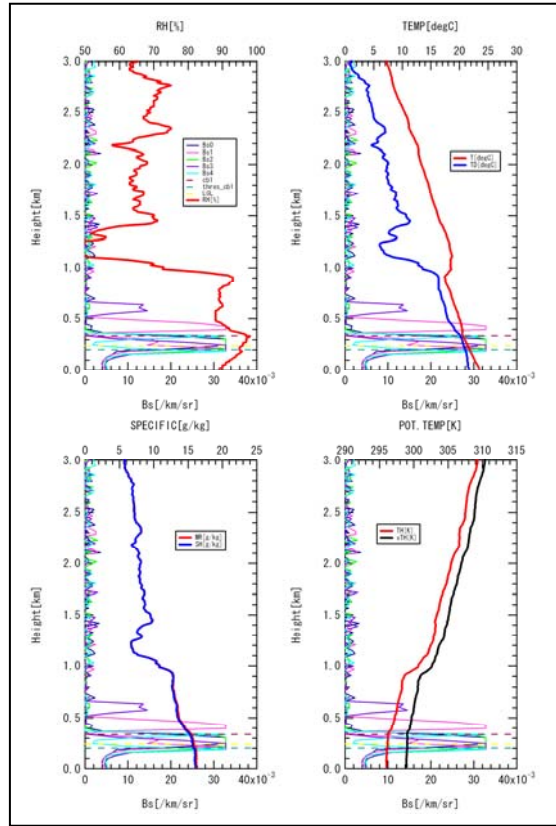
Sonde No.33 2005/6/24 19:17



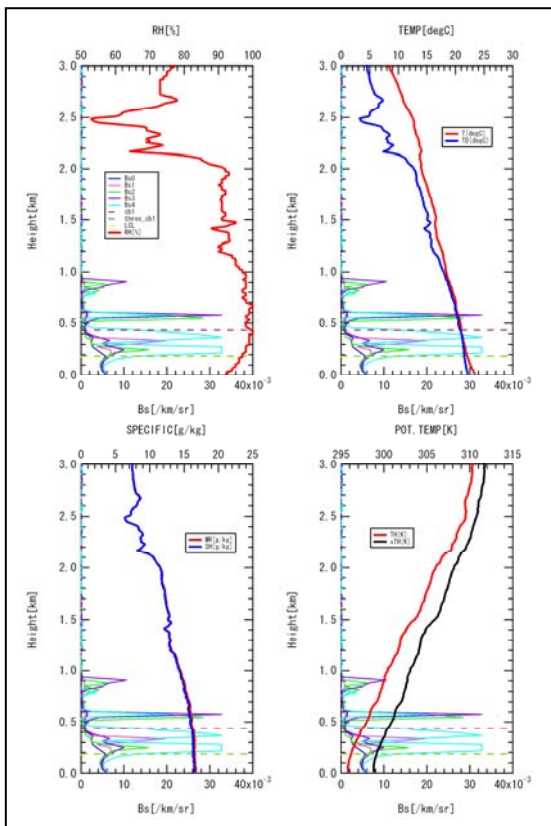
Sonde No.34 2005/6/25 0:30



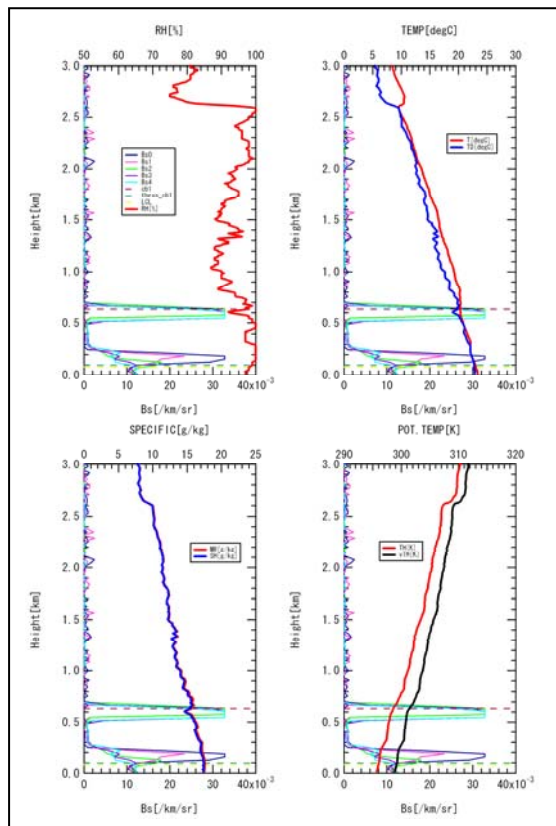
Sonde No.35 2005/6/25 6:01



Sonde No.37 2005/6/25 18:28

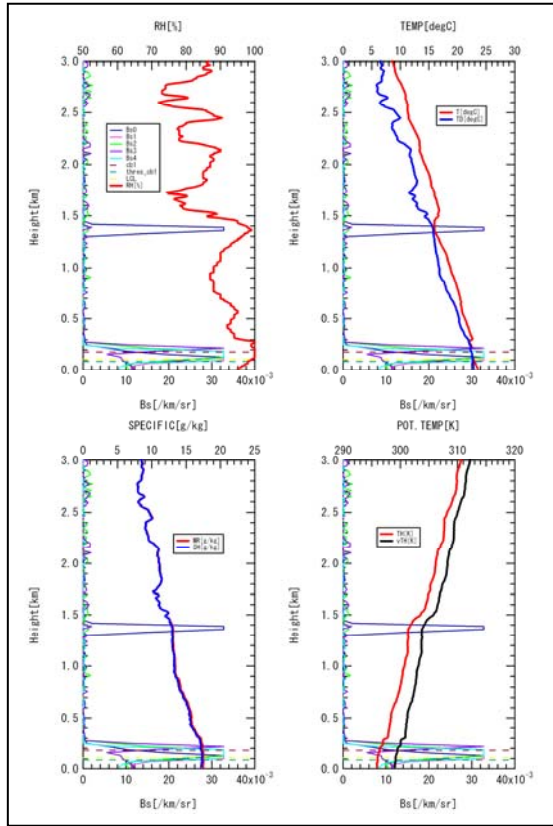


Sonde No.38 2005/6/25 21:35

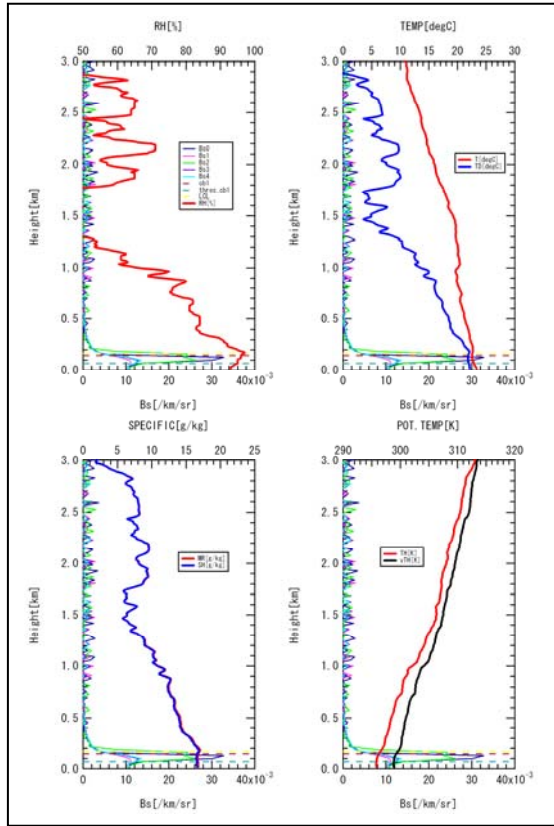




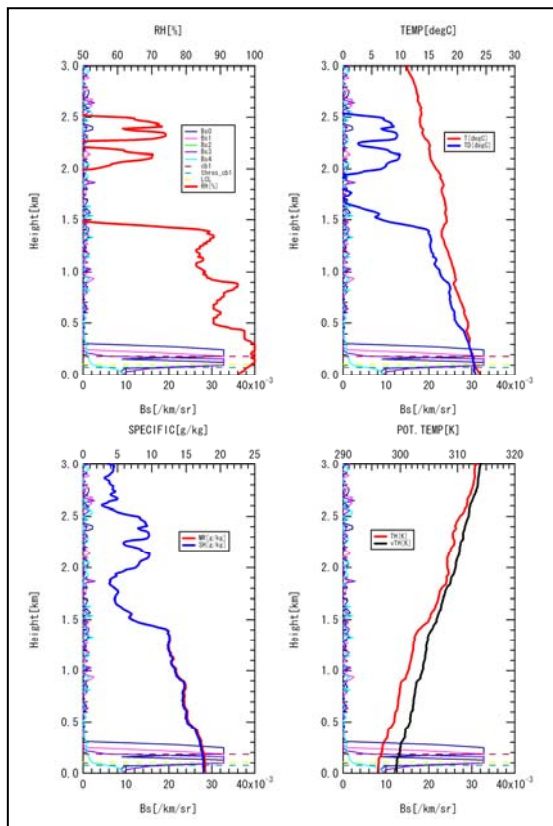
Sonde No.39 2005/6/26 3:21



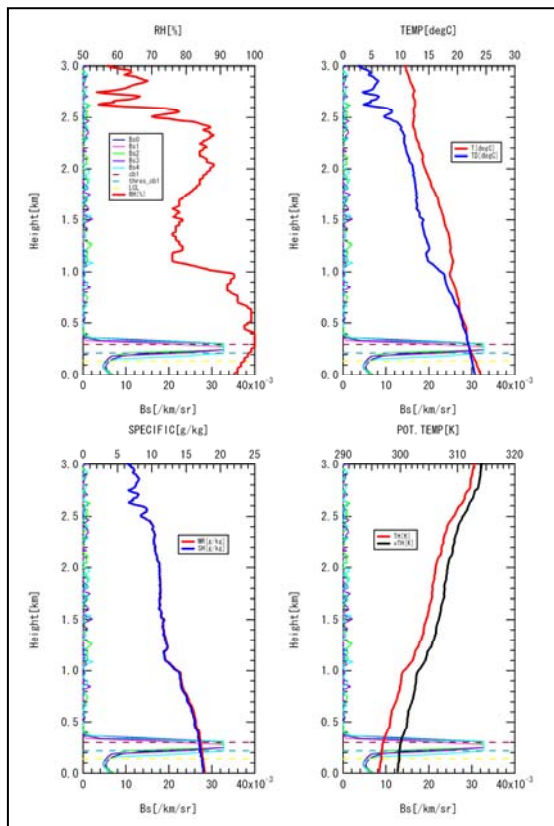
Sonde No.41 2005/6/26 15:01



Sonde No.42 2005/6/26 17:59

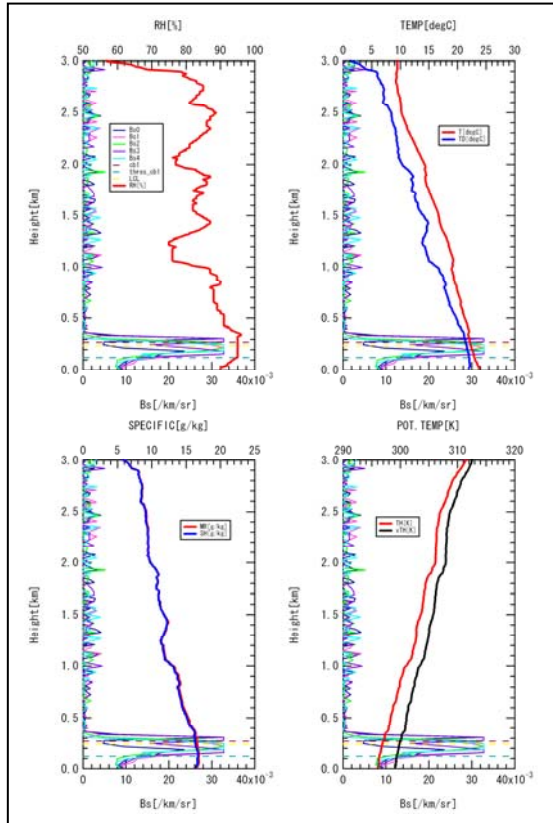


Sonde No.43 2005/6/27 3:12

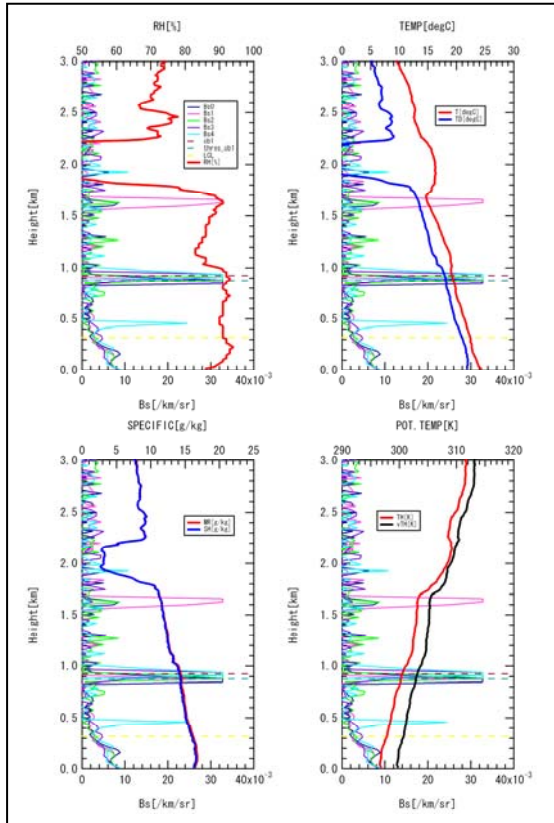




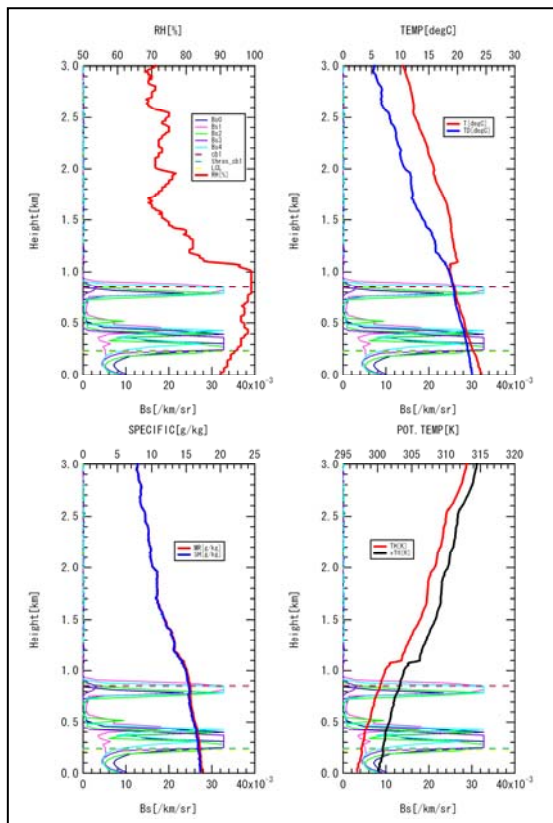
Sonde No.44 2005/6/27 8:34



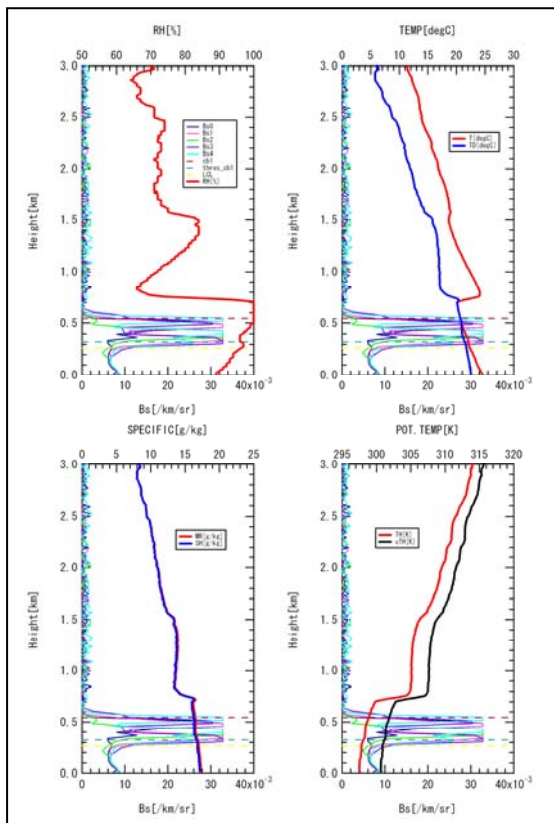
Sonde No.45 2005/6/27 12:33



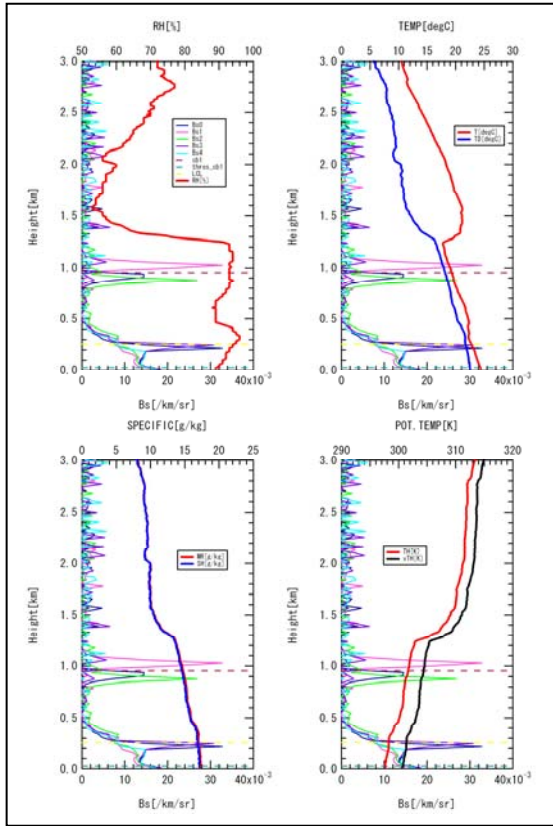
Sonde No.46 2005/6/28 0:16



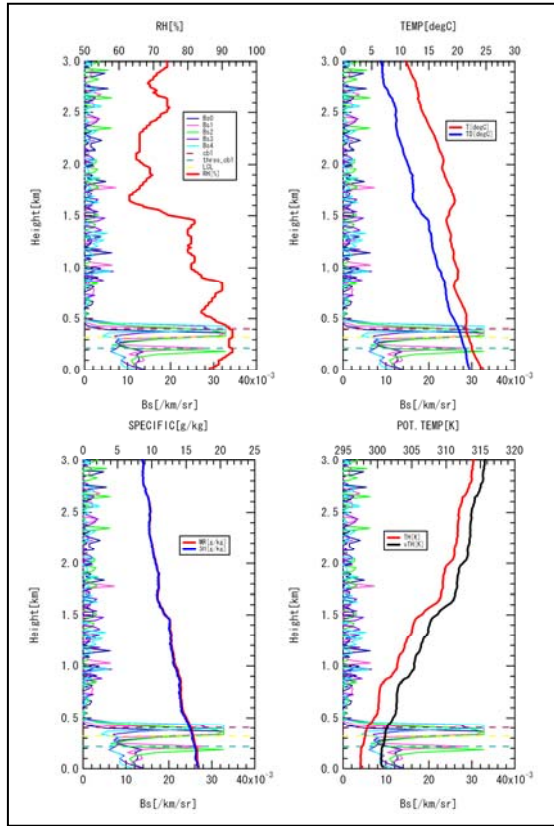
Sonde No.47 2005/6/28 3:39



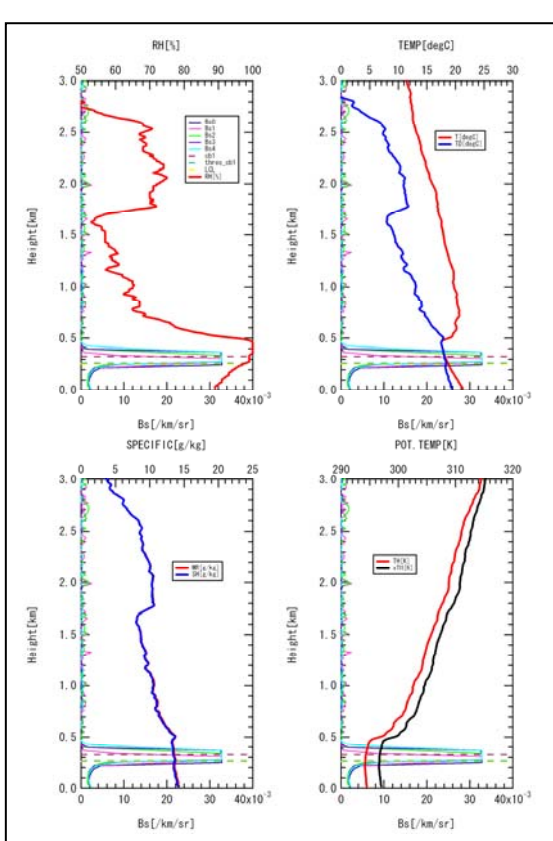
Sonde No.48 2005/6/28 10:06



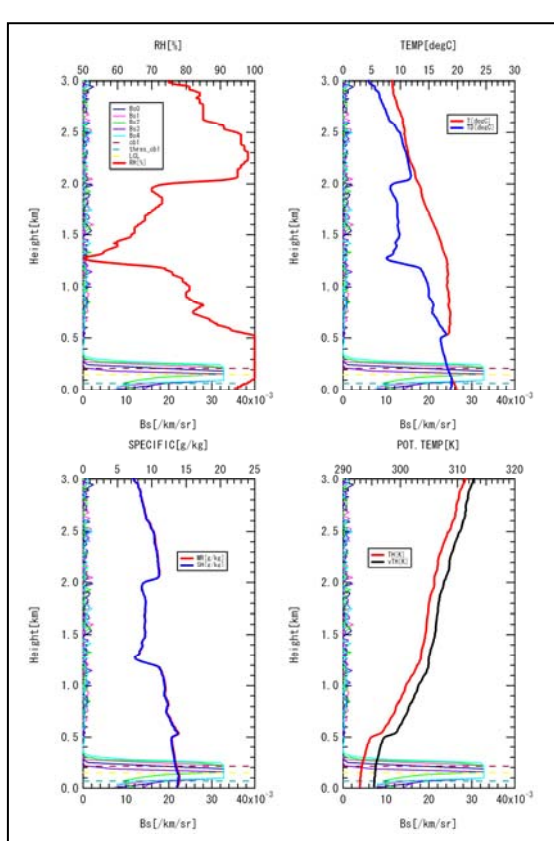
Sonde No.49 2005/6/28 12:45



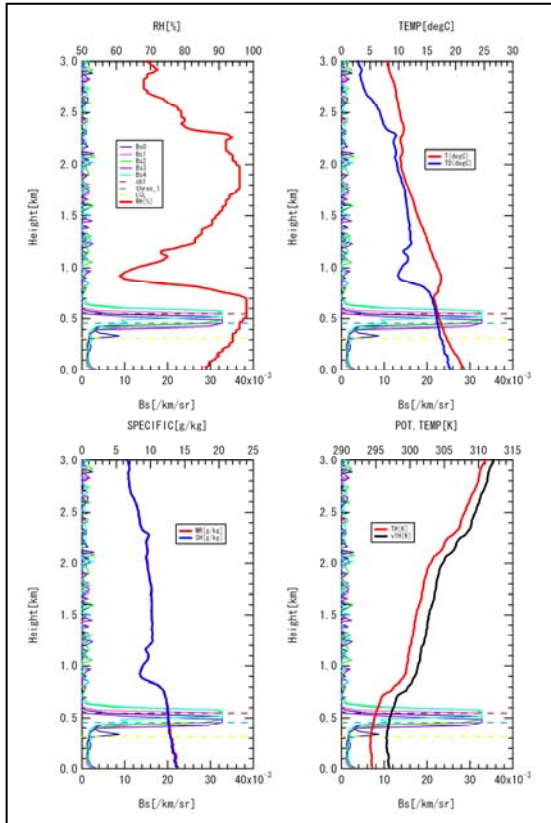
Sonde No.50 2005/6/28 18:40



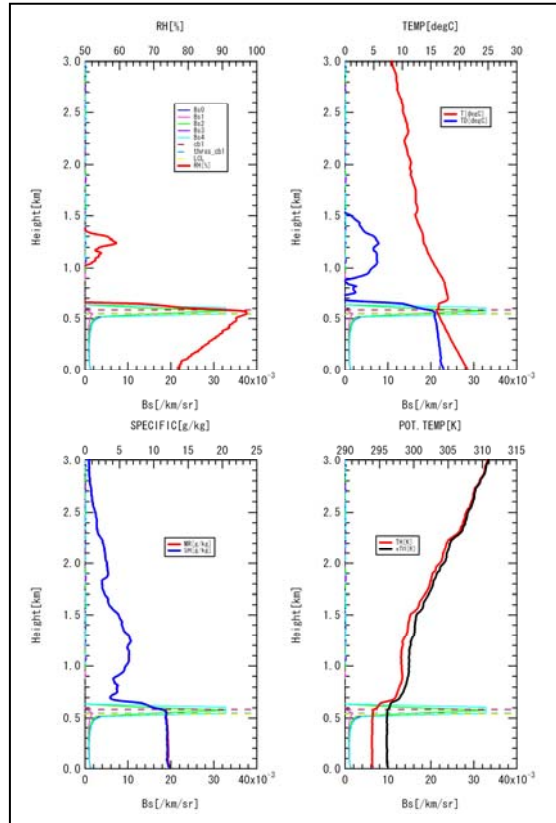
Sonde No.51 2005/6/28 21:11



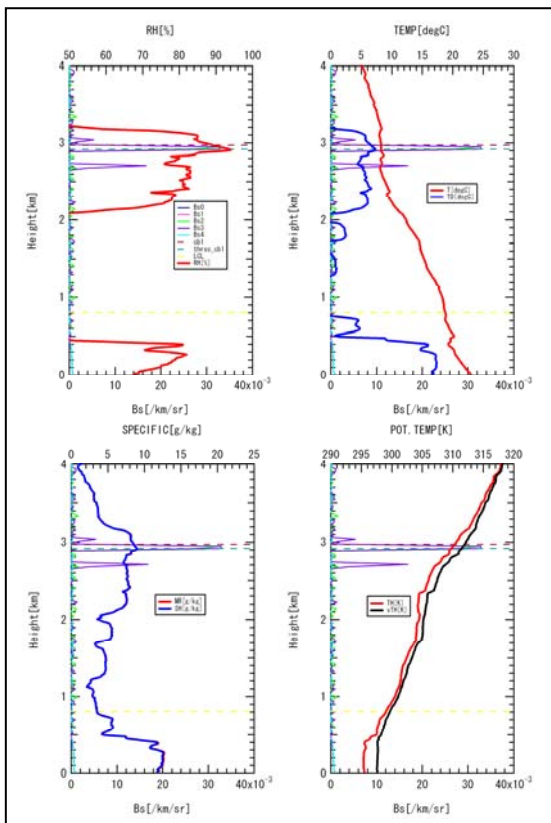
Sonde No.52 2005/6/29 5:47



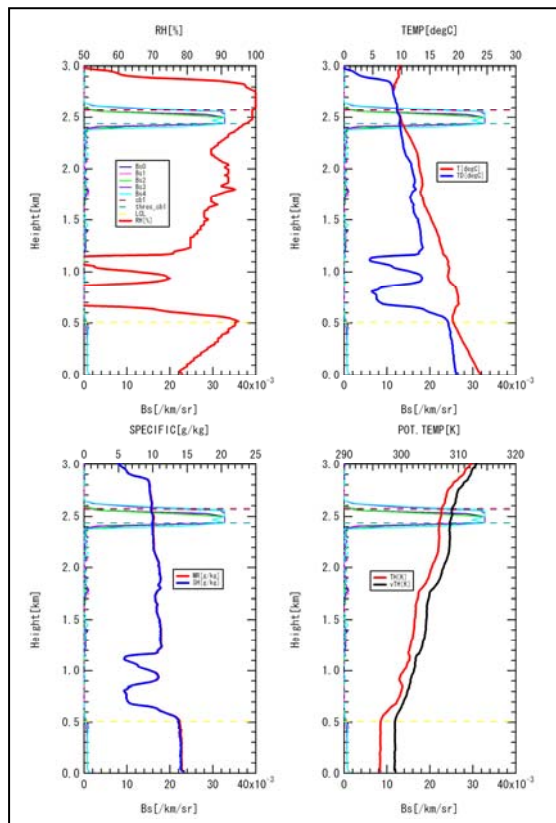
Sonde No.55 2005/6/29 21:15



Sonde No.59 2005/6/30 16:20

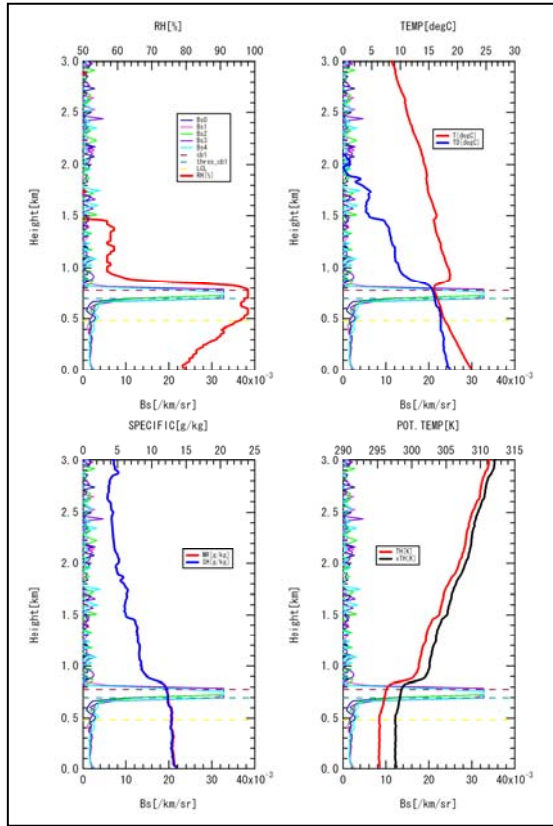


Sonde No.61 2005/7/1 2:45

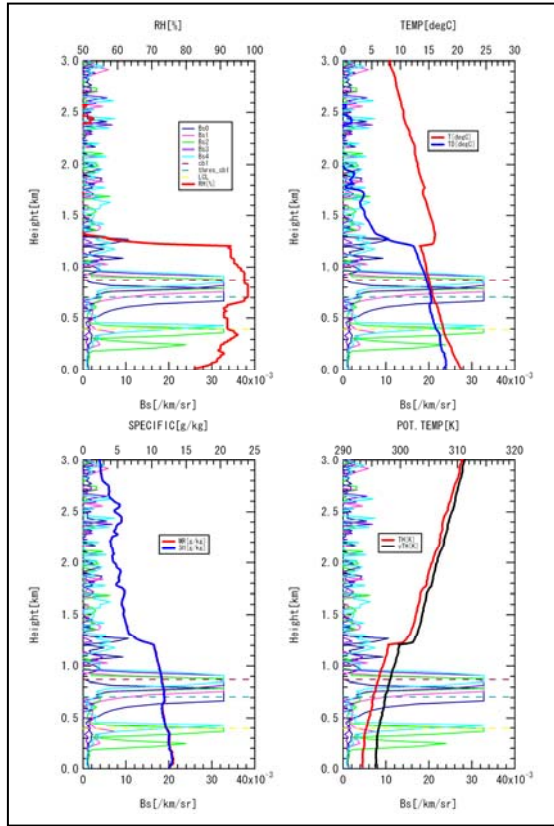




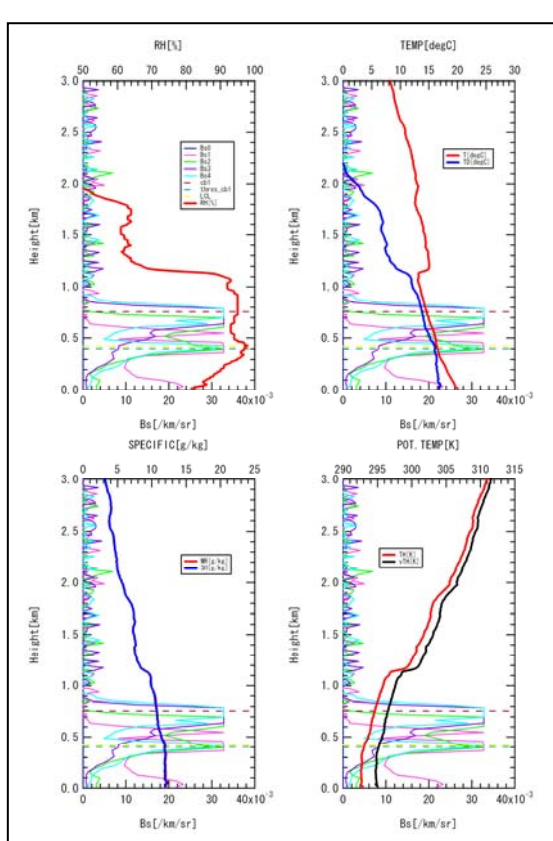
Sonde No.62 2005/7/3 5:52



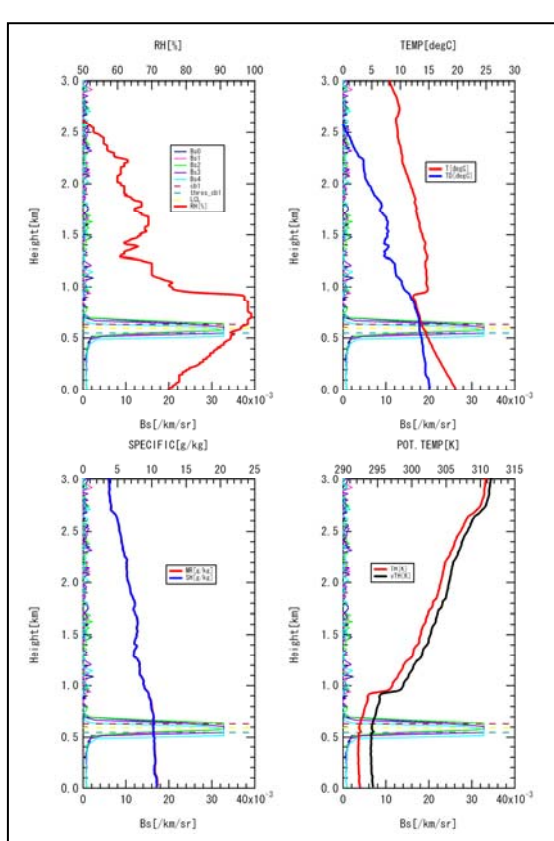
Sonde No.63 2005/7/3 10:19



Sonde No.64 2005/7/3 13:08

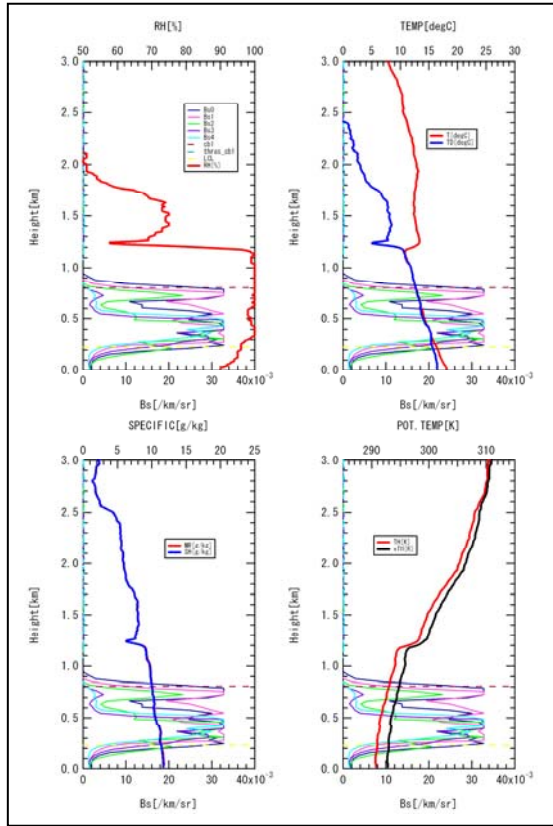


Sonde No.65 2005/7/3 16:51

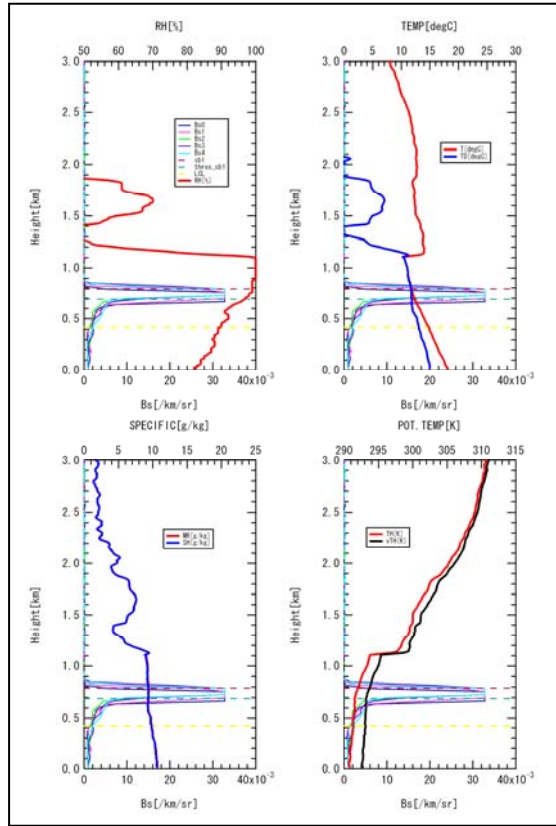




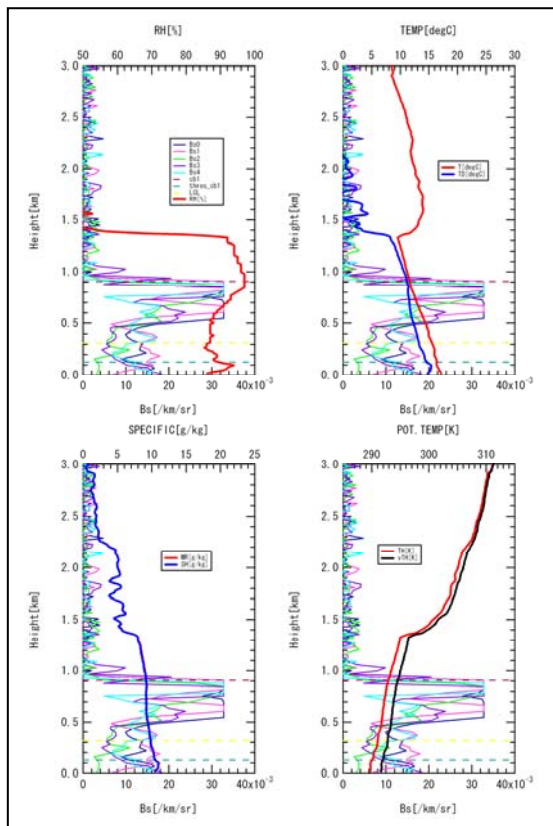
Sonde No.66 2005/7/3 22:57



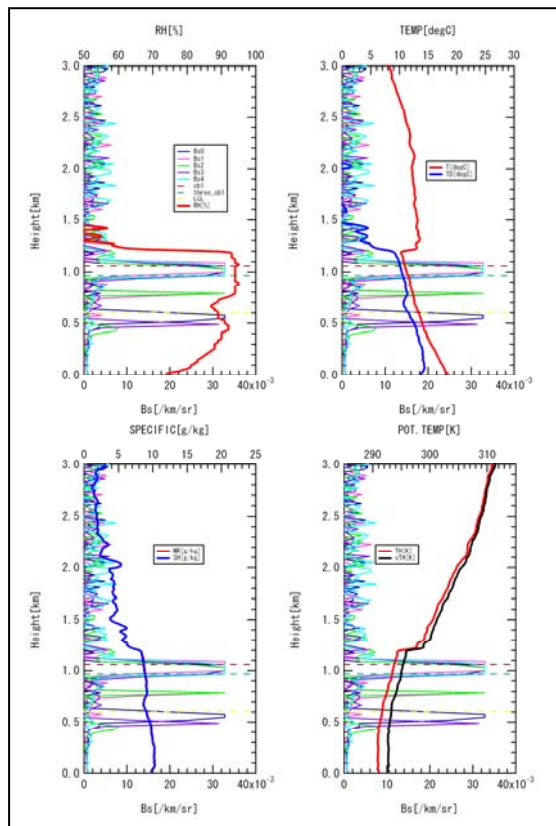
Sonde No.67 2005/7/4 2:13



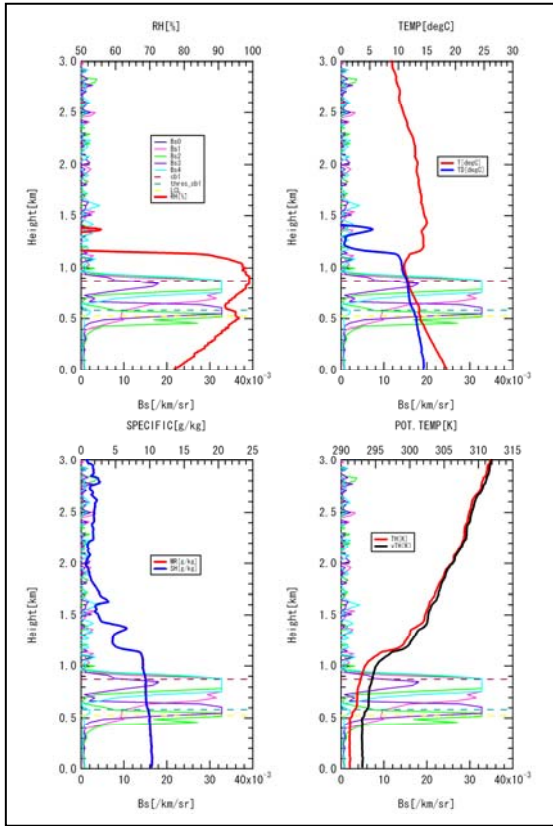
Sonde No.68 2005/7/4 8:08



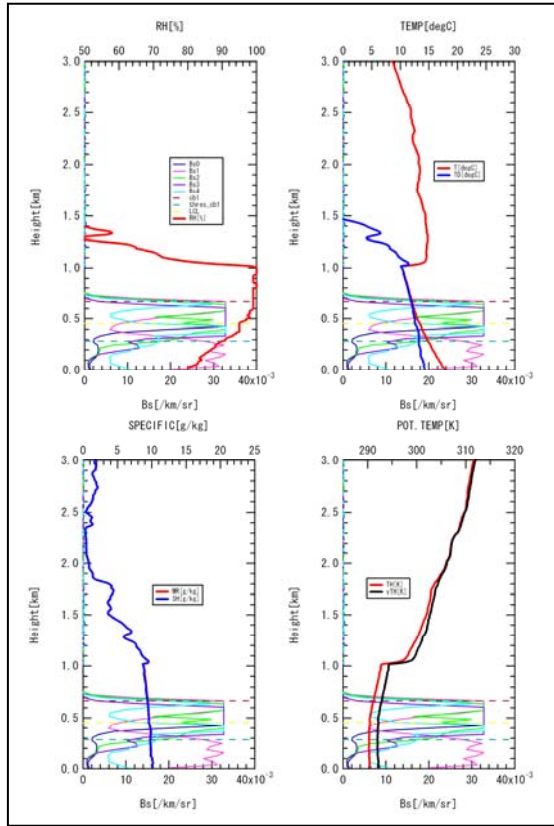
Sonde No.69 2005/7/4 10:32



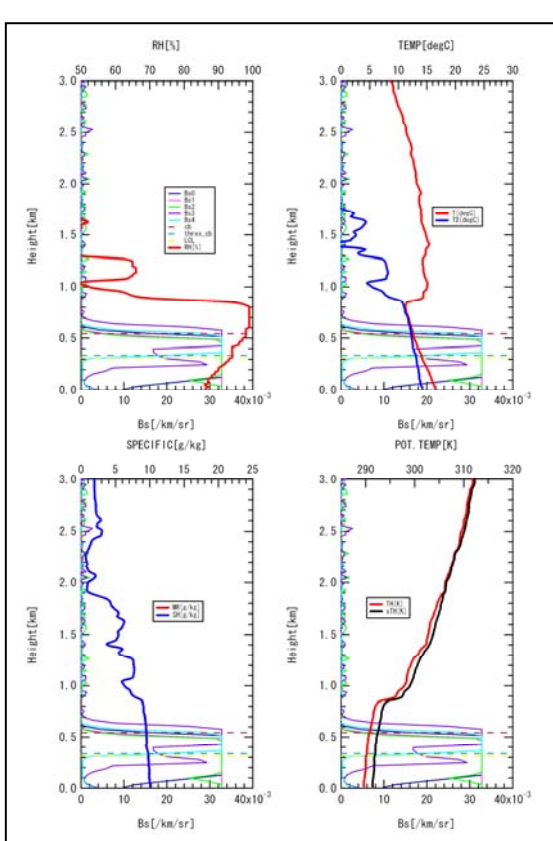
Sonde No.70 2005/7/4 16:08



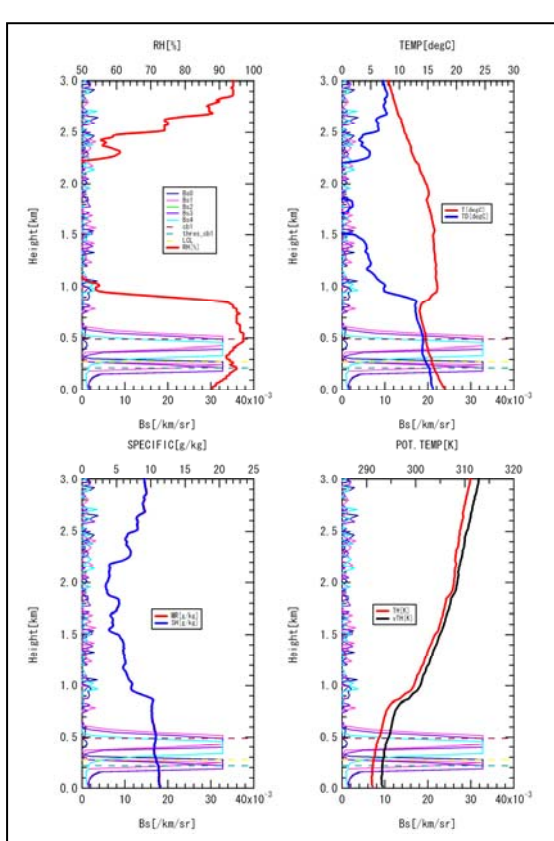
Sonde No.71 2005/7/4 19:36



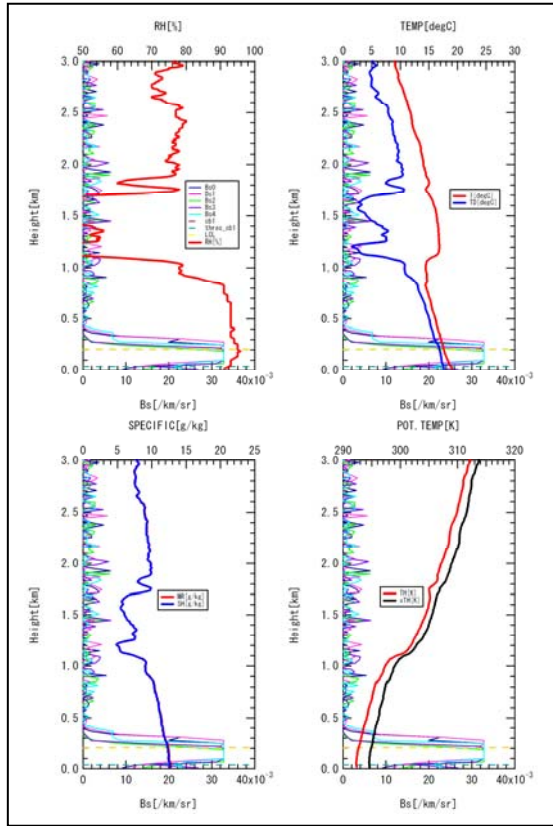
Sonde No.72 2005/7/5 3:34



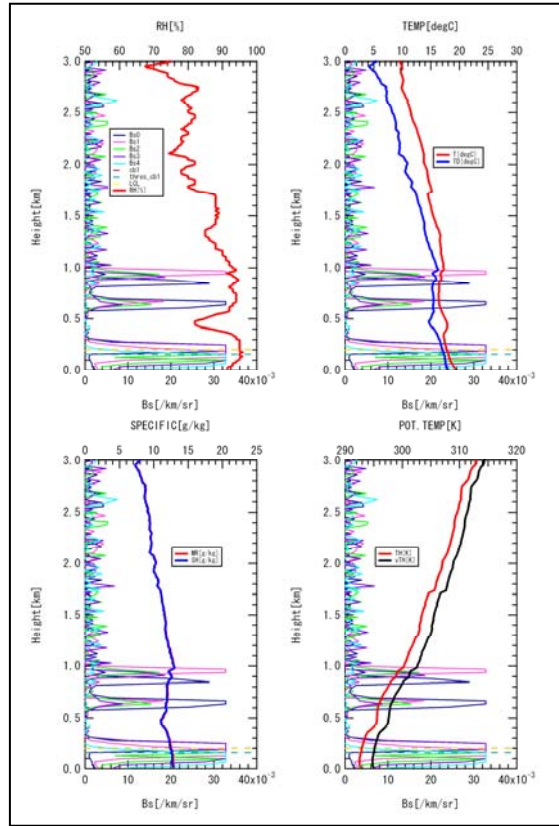
Sonde No.73 2005/7/5 6:34



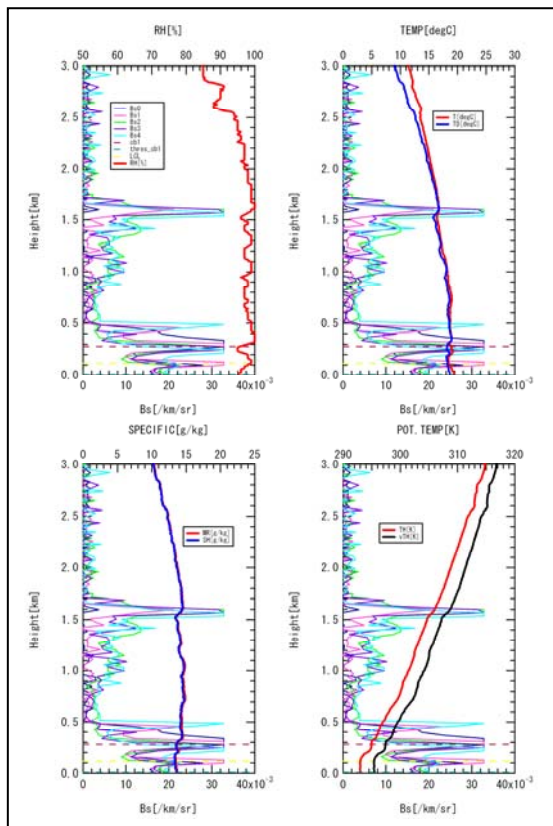
Sonde No.74 2005/7/5 9:04



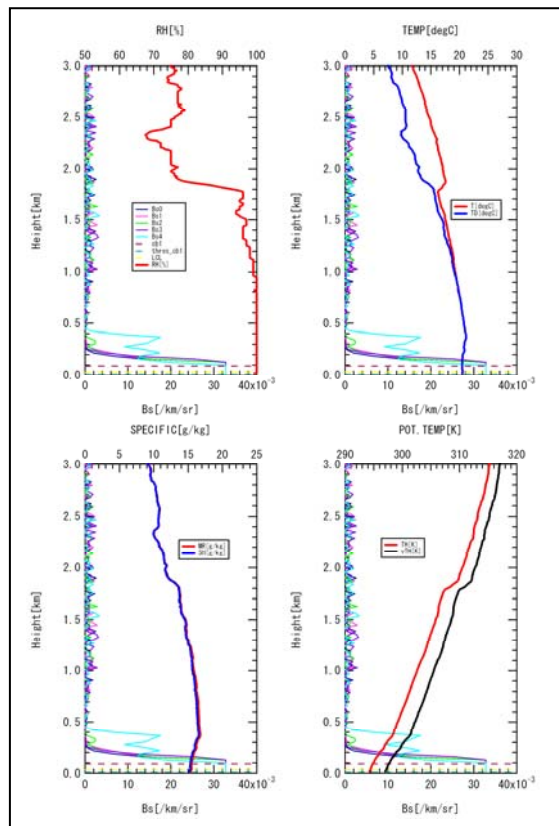
Sonde No.75 2005/7/5 11:18



Sonde No.76 2005/7/5 13:26

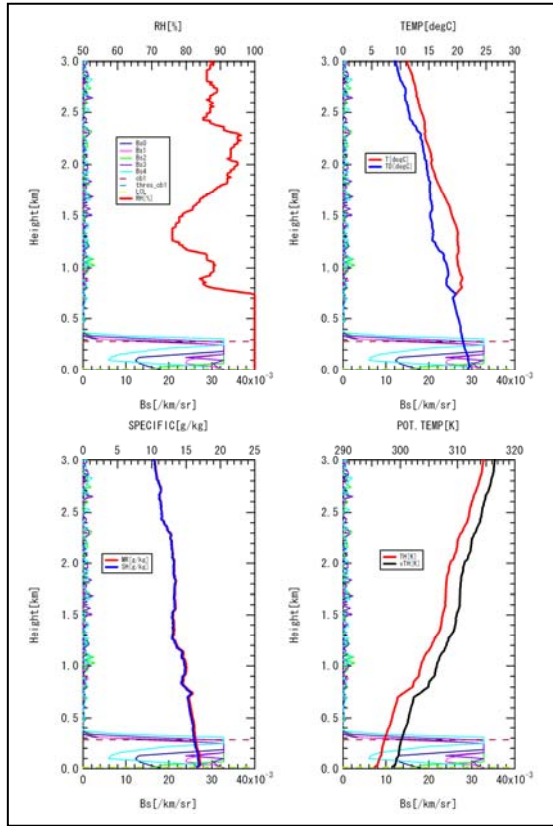


Sonde No.77 2005/7/5 15:39

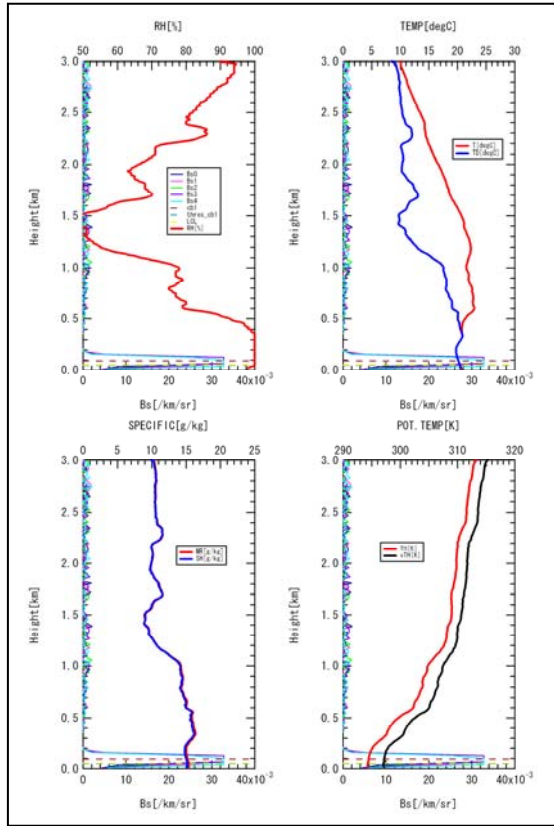




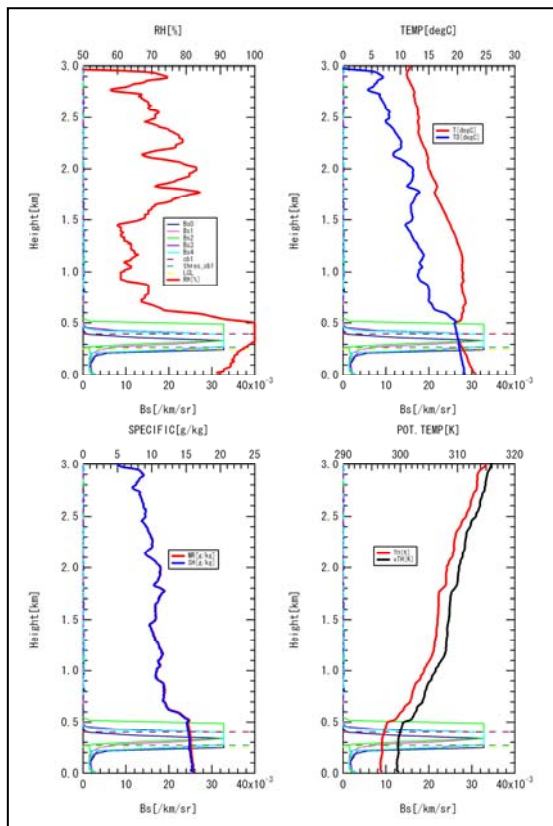
Sonde No.78 2005/7/5 17:34



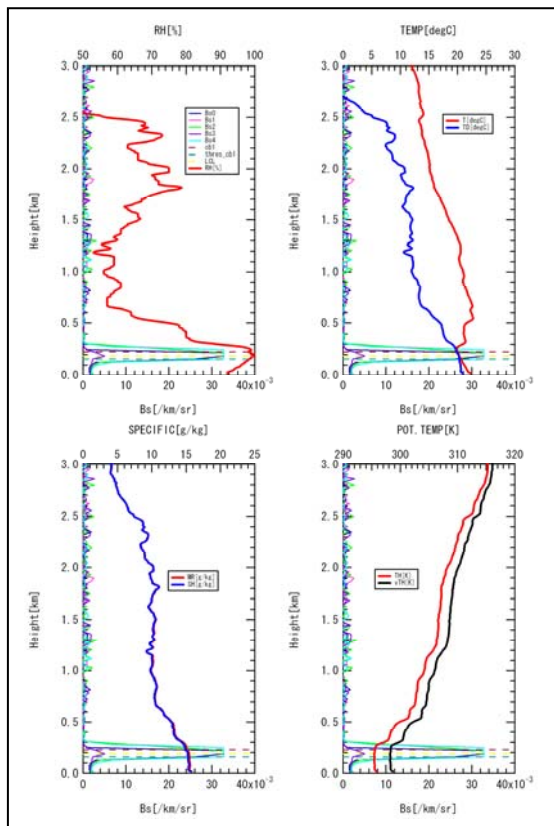
Sonde No.79 2005/7/5 21:49



Sonde No.80 2005/7/6 1:33

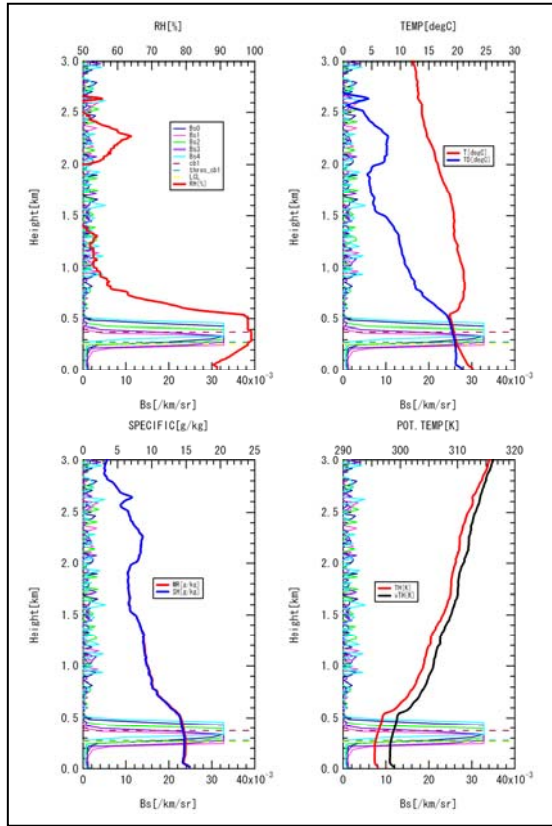


Sonde No.81 2005/7/6 5:05

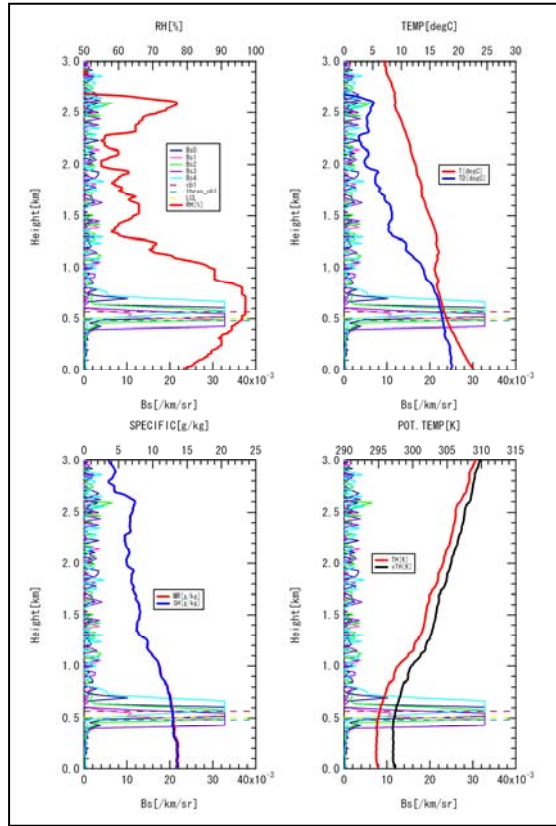




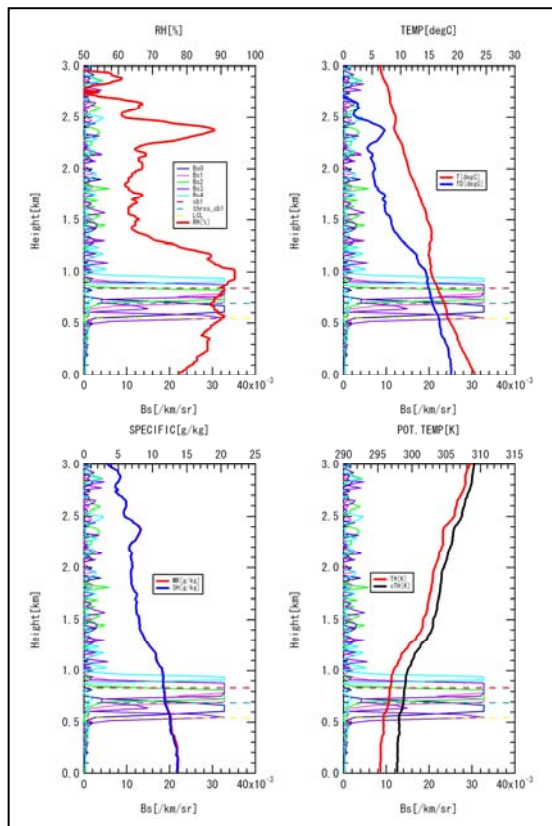
Sonde No.82 2005/7/6 8:39



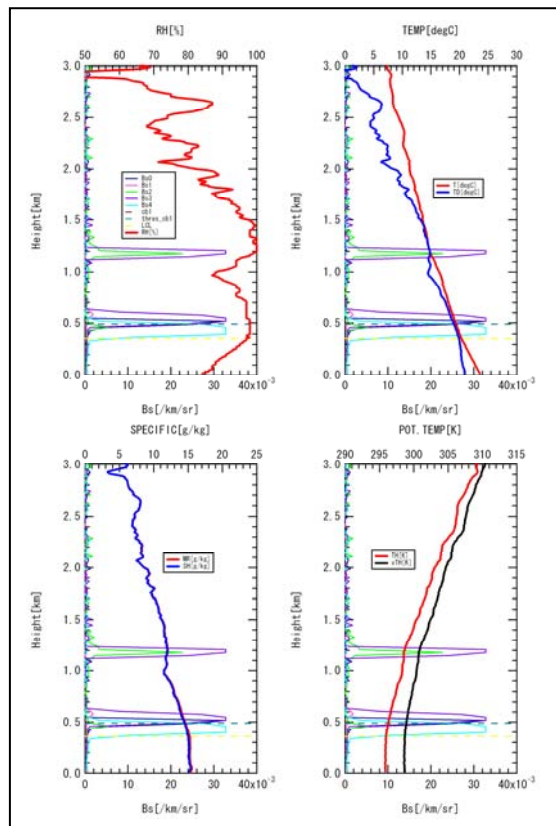
Sonde No.84 2005/7/8 9:07



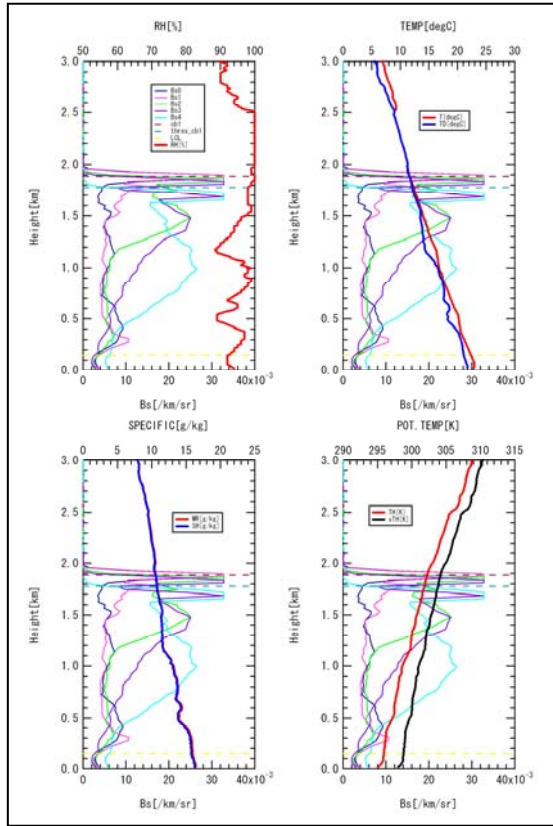
Sonde No.85 2005/7/8 13:02



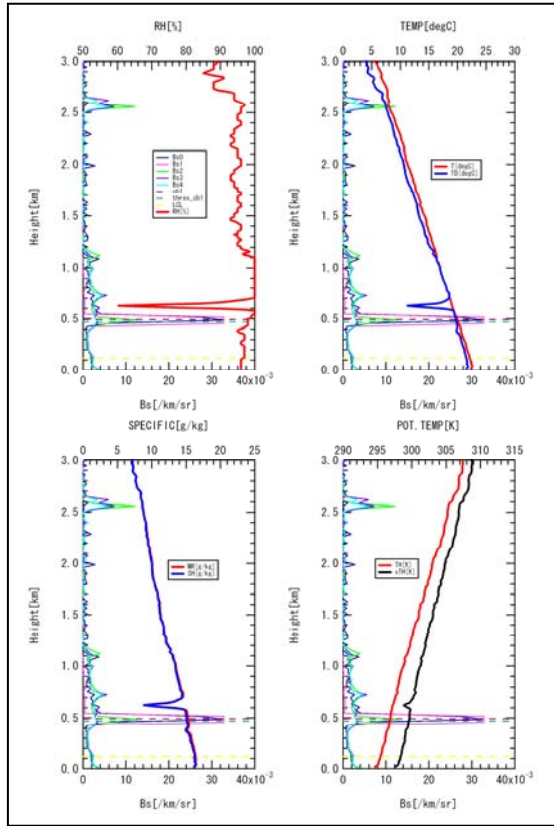
Sonde No.86 2005/7/8 17:52



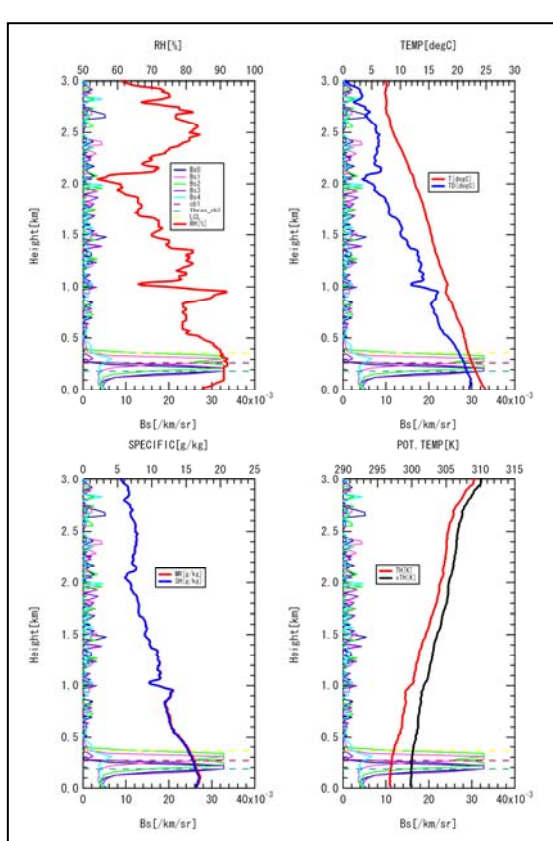
Sonde No.87 2005/7/8 21:28



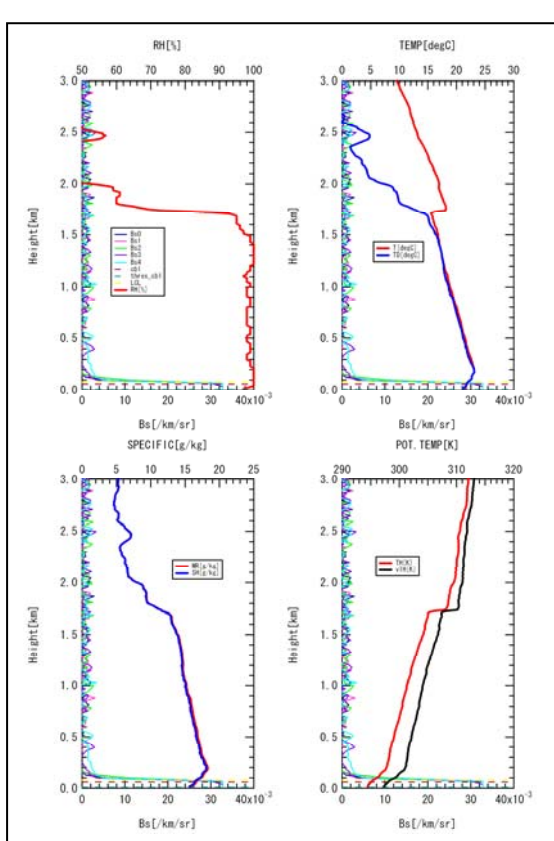
Sonde No.88 2005/7/8 23:48



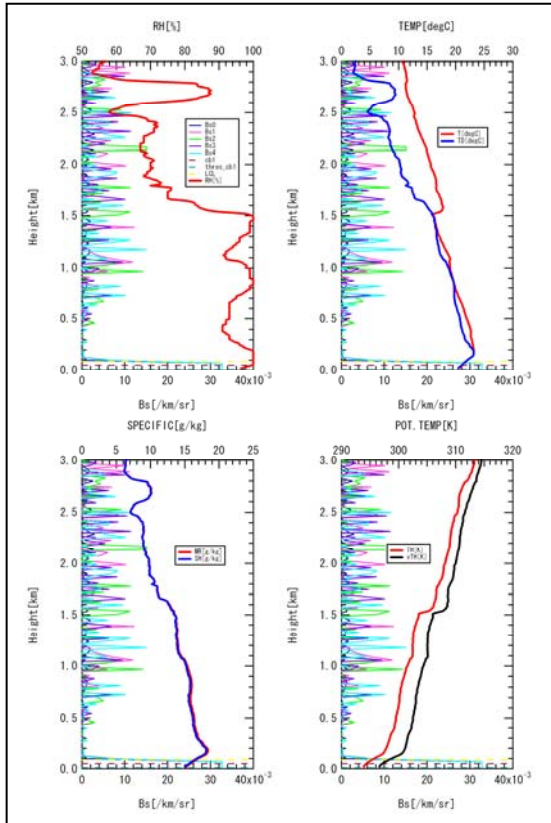
Sonde No.92 2005/7/9 14:22



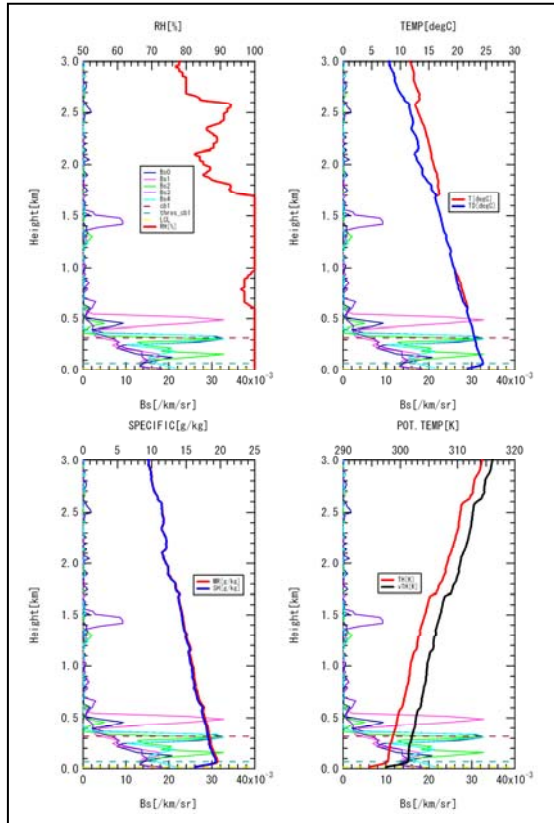
Sonde No.94 2005/7/11 14:10



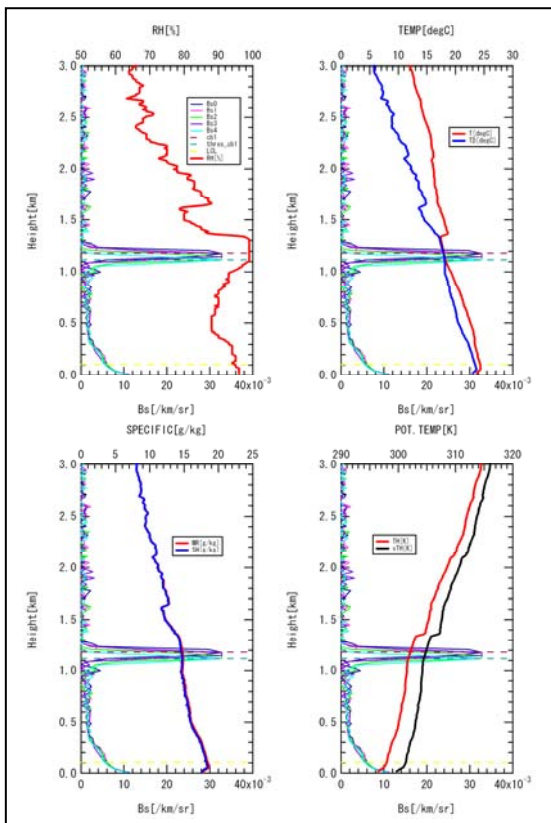
Sonde No.95 2005/7/11 16:41



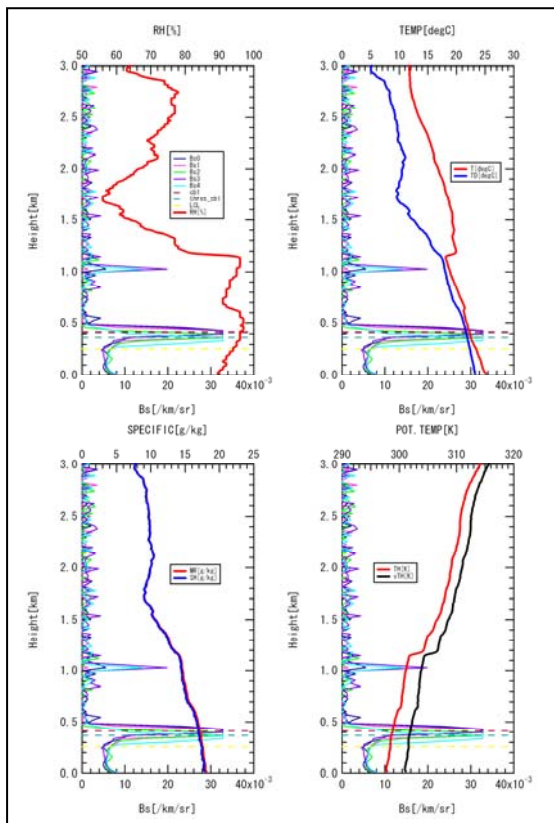
Sonde No.100 2005/7/12 4:33



Sonde No.101 2005/7/12 6:54

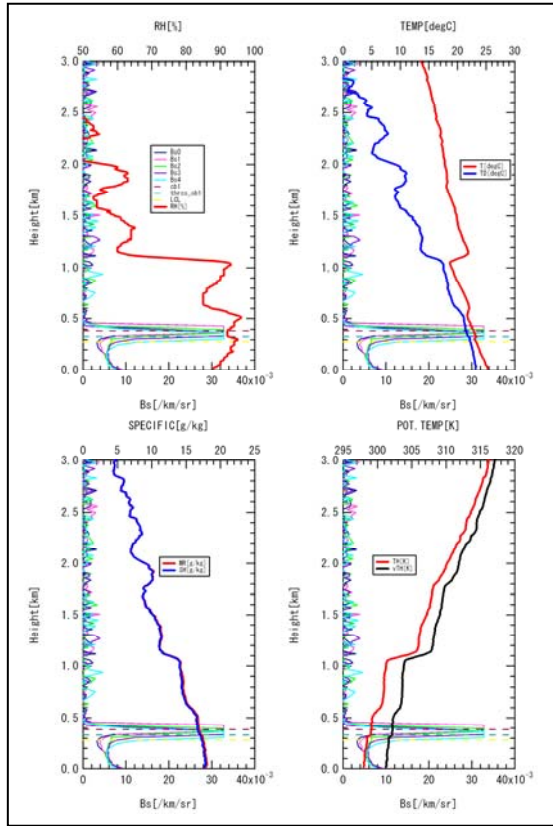


Sonde No.102 2005/7/12 9:18

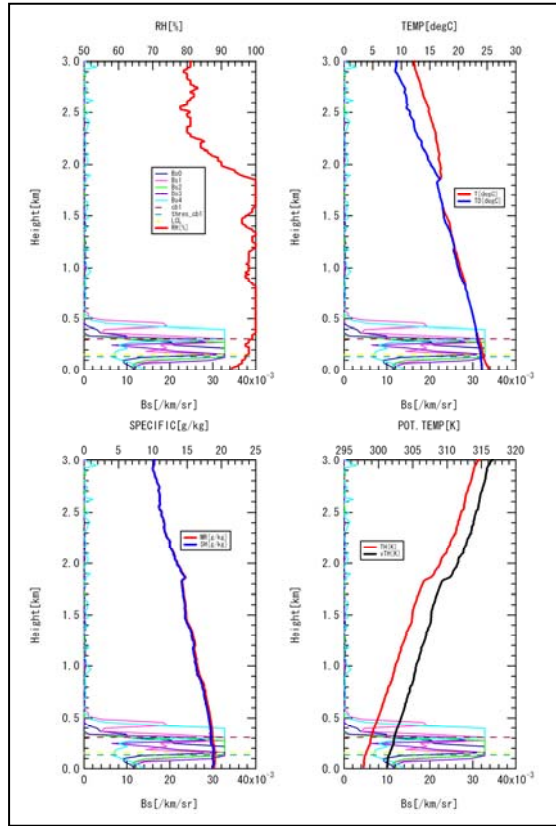




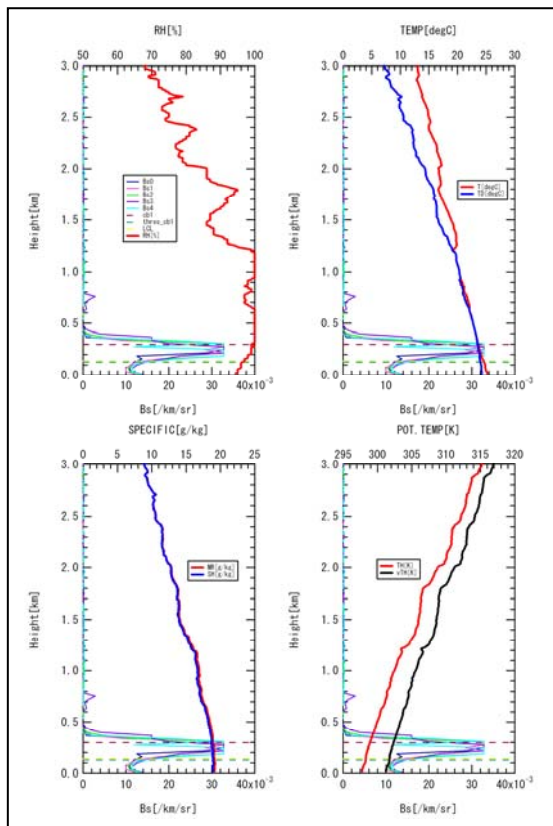
Sonde No.103 2005/7/12 13:24



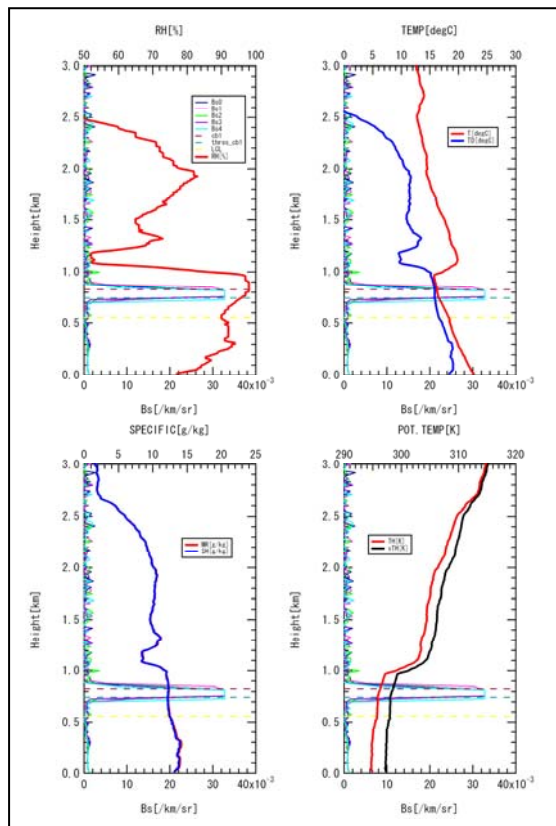
Sonde No.104 2005/7/12 23:21



Sonde No.105 2005/7/13 3:46

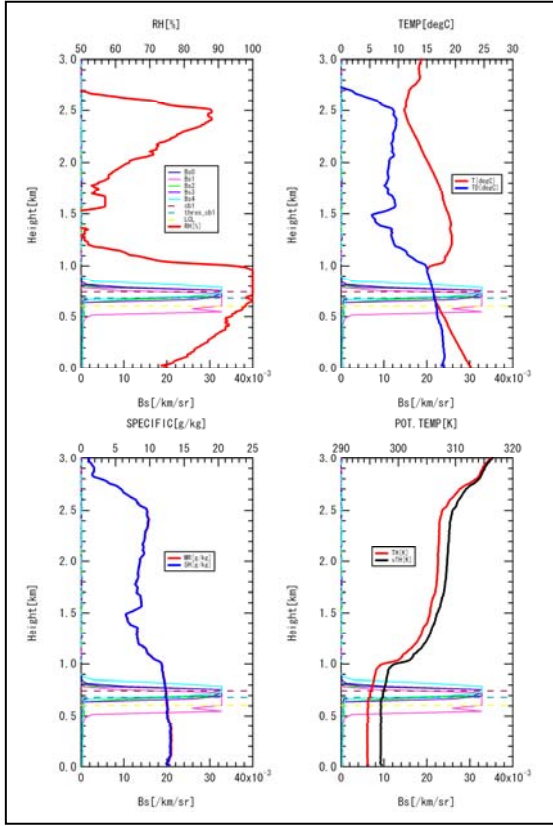


Sonde No.106 2005/7/13 16:41

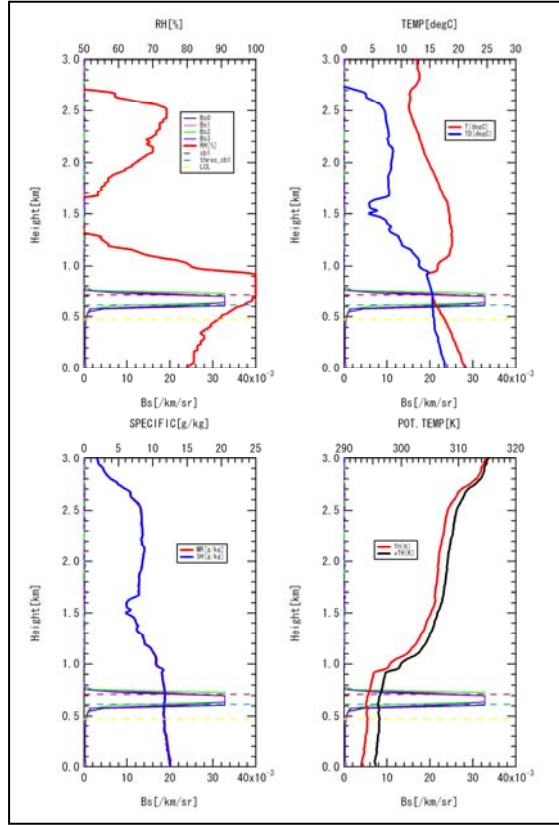




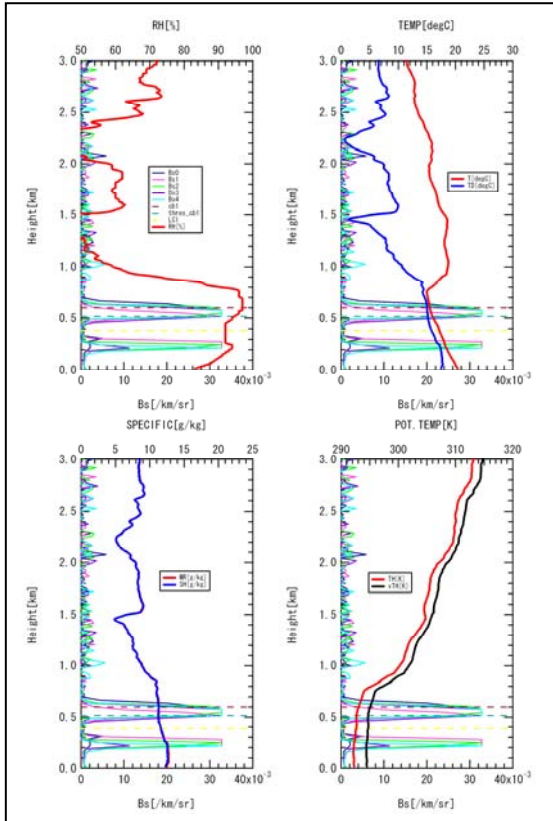
Sonde No.107 2005/7/13 21:34



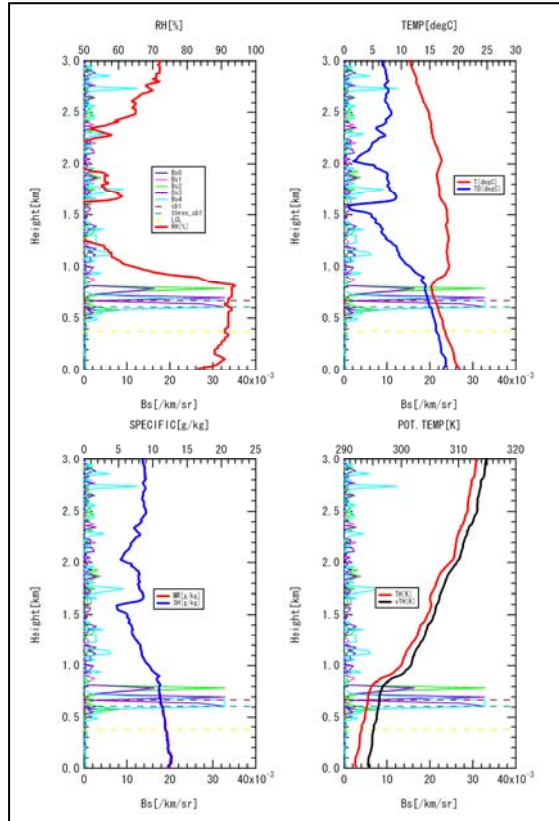
Sonde No.108 2005/7/14 00:12



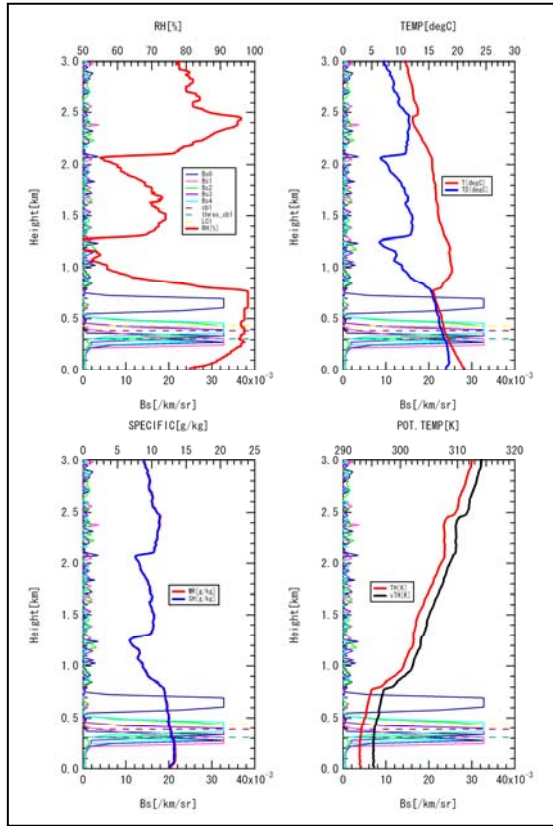
Sonde No.109 2005/7/14 7:13



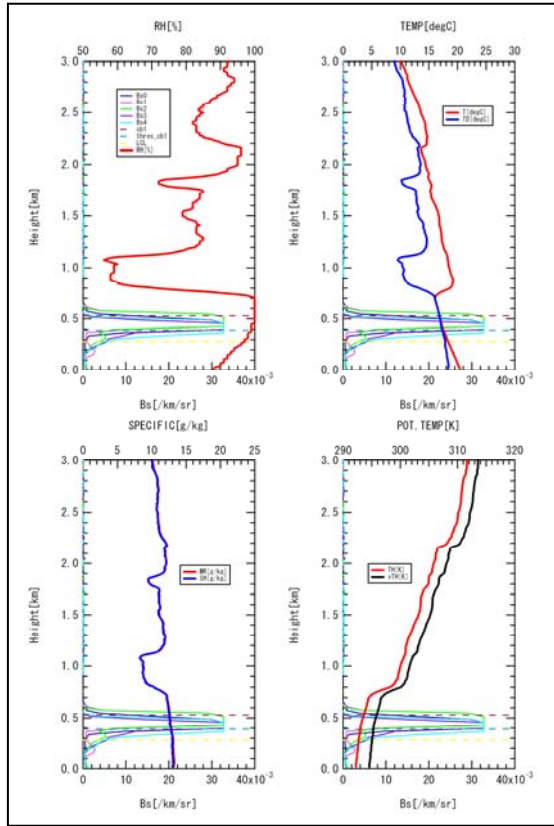
Sonde No.110 2005/7/14 10:18



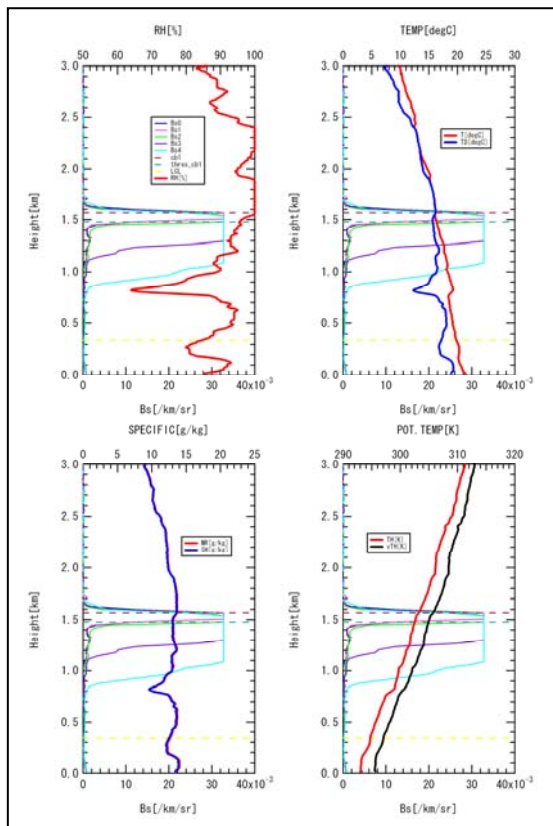
Sonde No.111 2005/7/14 16:33



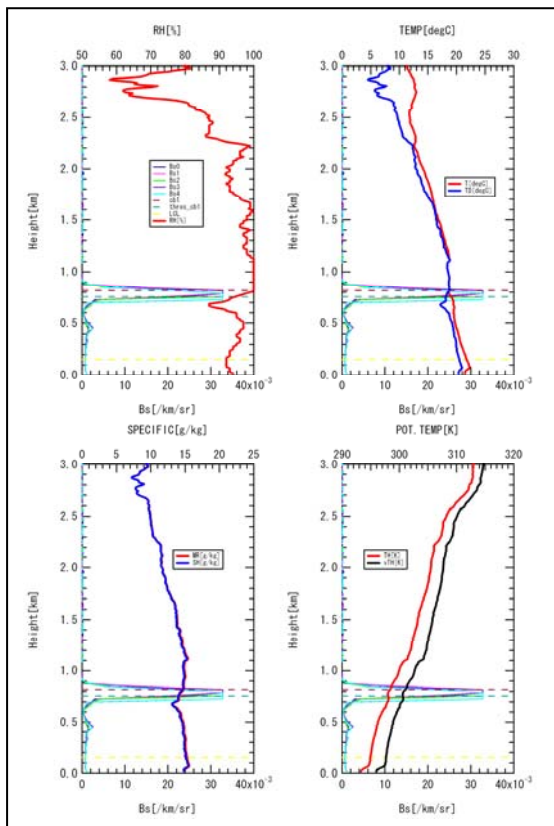
Sonde No.112 2005/7/14 17:00



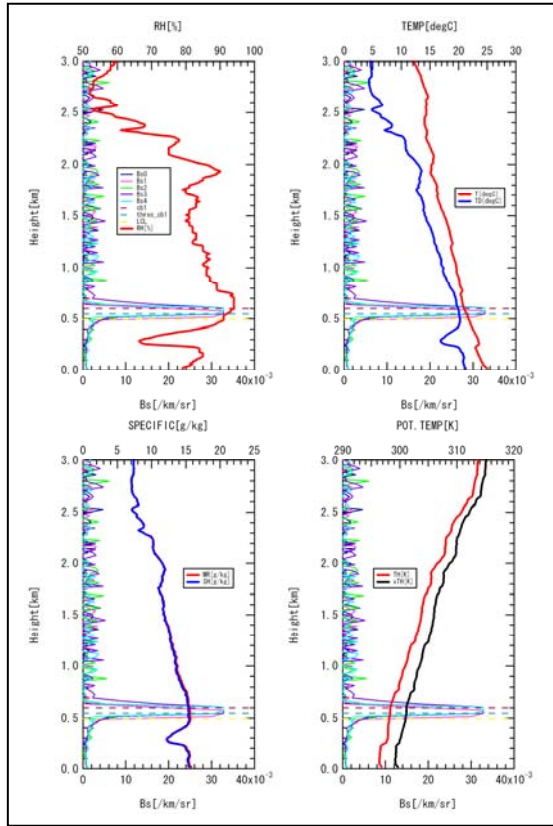
Sonde No.113 2005/7/15 0:33



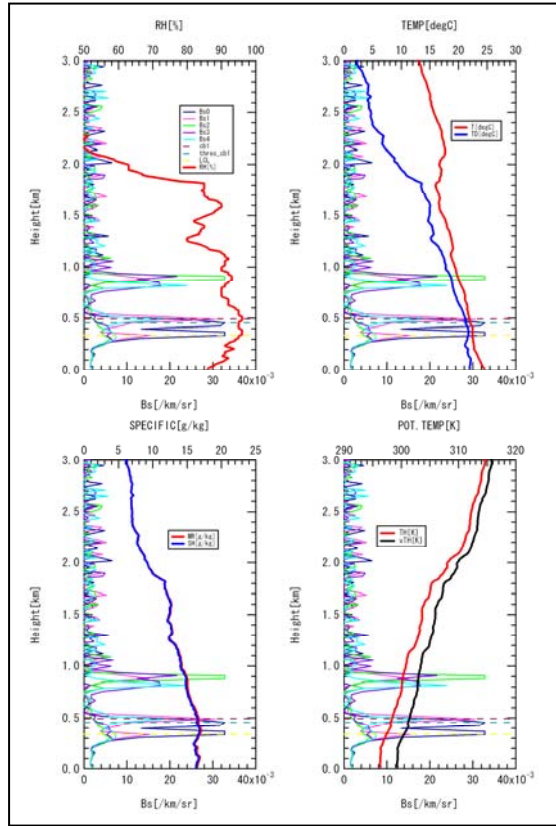
Sonde No.114 2005/7/15 3:08



Sonde No.115 2005/7/15 10:19



Sonde No.116 2005/7/15 13:16



## 6-2 結果及び考察

4-2 章で KESS2005 においてみられた 2 つの雲底高度の散布図を示したが、ラジオゾンデ観測時における同様の散布図を示す。

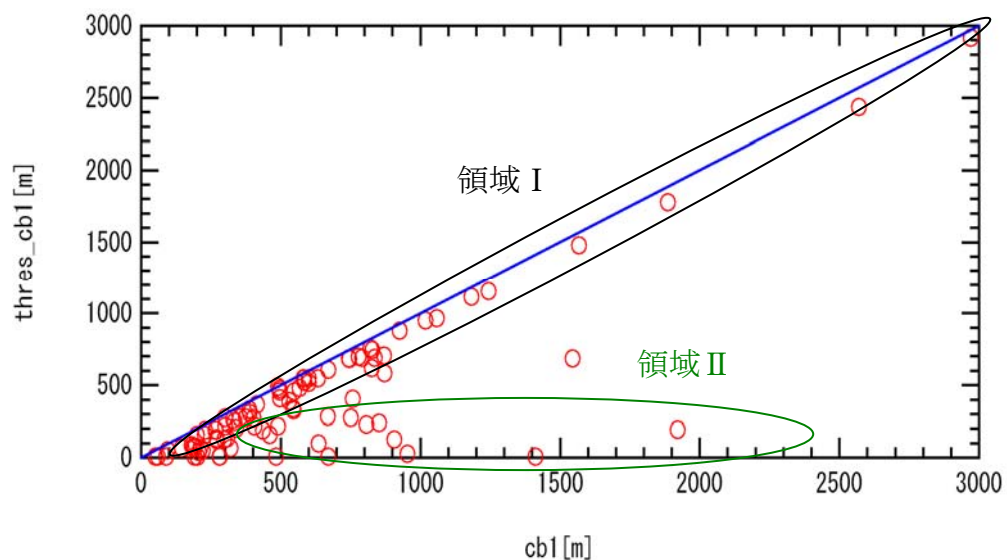


図 6-1 ラジオゾンデ観測時の第 1 雲底高度の散布図

図 6-1 から、図 4-4 と同様の傾向がみられることがわかる。そのため、ラジオゾンデ観測時の雲を、cb1 と thres\_cb1 の高度差が比較的少ないグループ（領域 I）と cb1 の値によらず thres\_cb1 が約 300 m 以下の値をとるグループ（領域 II）にわけて、どのような事実に基づいて差異が生じていたのかを考えることとする。



KESS2005 における領域 I の雲にみられる典型的なデータ例（図 6-2）を先に示し、次に期間全体の傾向と考察を行う。

### Sonde No. 67 2005/7/4 2:13 (JST)

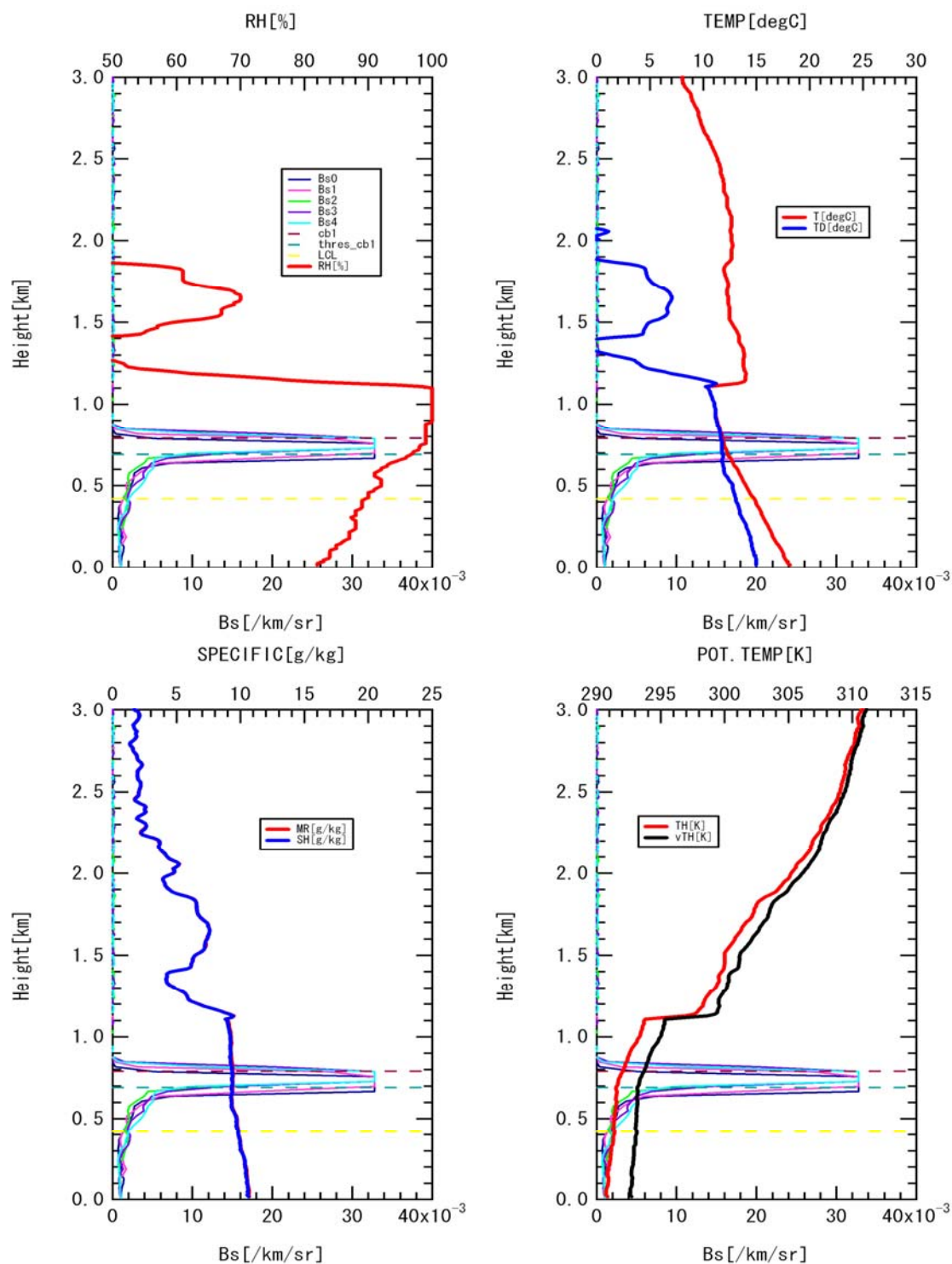


図 6-2 Sonde No.67 の気象データと Bs のプロファイル

(a) 雲底高度とその高度における相対湿度

Sonde No.67 (図 6-2) を見ると、高度 0 m から高度 1100 m まで、相対湿度が徐々に上昇しており、その上の高度において相対湿度はかなり大きな減少が見られることがわかる。高度 0 m から順に Bs 値の変動に着目すると、相対湿度の上昇に伴い少しずつ上昇し、約 700 m で thres\_cb1 が現れ、約 800 m で cb1 が判別されている。このときの相対湿度の値は、thres\_cb1 で 97.7%を、cb1 が 99%を示していた。図 6-3 に雲底高度とその高度における相対湿度の散布図を示す。

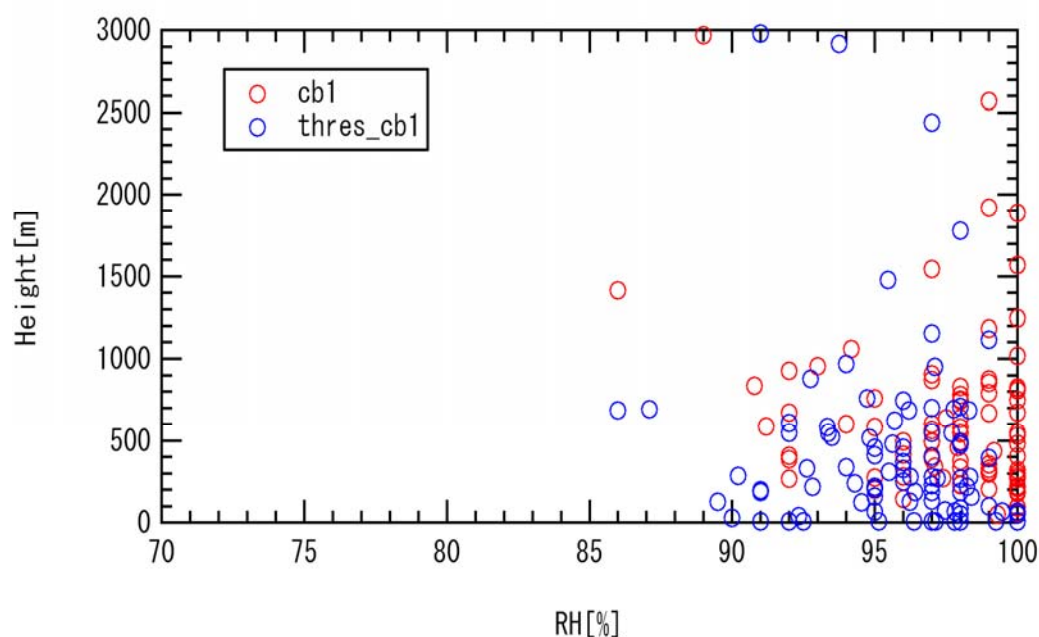


図 6-3 各第 1 雲底高度における相対湿度[%]

図 6-3 から、全体として、相対湿度が約 90%を超える領域で、雲底が判別されていたことがわかる。(ただし、相対湿度が 90%以上あれば必ず Bs 値は高くなり、必ず雲があるかという、そうではないこともあった。その例として Sonde No.61 が典型的で、図 6-4 に示している。)

また、2つの雲底高度での相対湿度の平均値を示すと、cb1 = 97.3%, thres\_cb1 = 95.7%であった。各々の判別方法による相対湿度の順は、cb1 > thres\_cb1 となる。しかし、両者の相対湿度の高度依存性は小さく、相対湿度だけでは、どちらがより雲底らしいかを議論することは難しい。

また、図 6-3 は、相対湿度が 100%に至らず、明らかな過飽和状態になっていなくても、雲はできるということを示している。これは、海上大気に雲粒子の生成を促す吸水性の凝結核となる海塩粒子などが多数存在していることを示している。また、Sonde No.67 でみられるように、相対湿度は、気温と露点温度の差からも表現できるため、気温と露点温度の差と雲底高度との相関がよく見られたと言い換えることも出来る。

相対湿度と Bs 値の相関が高いことは、図 6-3 の結果より明らかであるので、シーロメーターによる雲底判別高度よりも上で、かつ、相対湿度の著しい低下がなければ、雲は続いているとみなすことが出来る。Sonde No.67 での相対湿度の低下は 1100 m からみられ、その高度より上で相対湿度が高い領域は存在しない。(Bs プロファイルでは 800 m 以上でレーザー光が透過しないため値が 0 となっている。)つまり、この高度が雲頂高度とみなせる。また、この高度での他の気象要素をみると、雲底付近の高度で見られる傾向に比べ、明らかな変化が読み取れる。気温では、強い逆転が見られる。このように、シーロメーターによる雲底とラジオゾンデからの相対湿度プロファイルから、雲頂高度は明らかにかつ精度良く決めることができる。

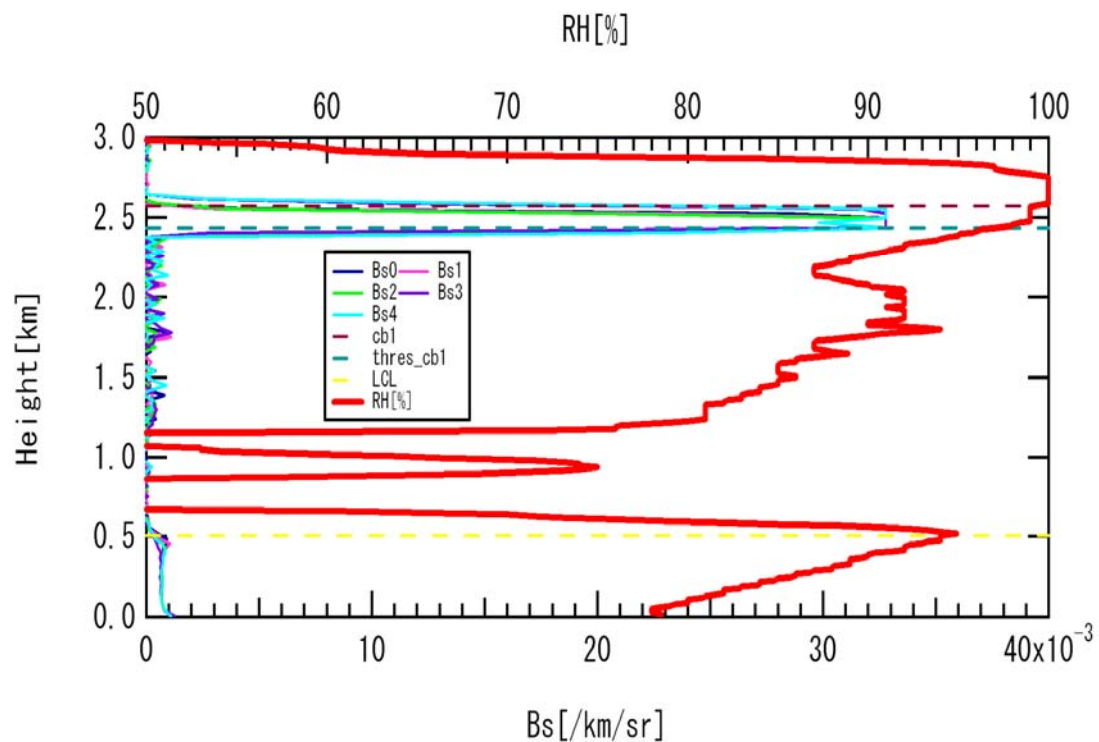


図 6-4 Sonde No.61 で見られる相対湿度と Bs の変動

Sonde No.61 では、高度 2.5 km 前後で、cb1 と thres\_cb1 が検出されており、レーザー光の雲による減衰の影響は、この高度より上の高度で大きい。高度 0.5 km 前後では、明らかに相対湿度は高い値を示しているのだが、Bs 値に応答が見られていないことから、実際に雲粒子はできていないとみなすことができる。また、高度 0-0.5 km に着目すると、 $1 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}\text{sr}^{-1}$  程度の小さい Bs がみられることから、エアロゾルがあることがわかり、0.5 km が混合層高度と考えられる。これは、ラジオゾンデデータによる相対湿度プロファイルだけから雲底高度を見積もることは難しいことを示していると考えられる。



(b) 温位と雲底高度について

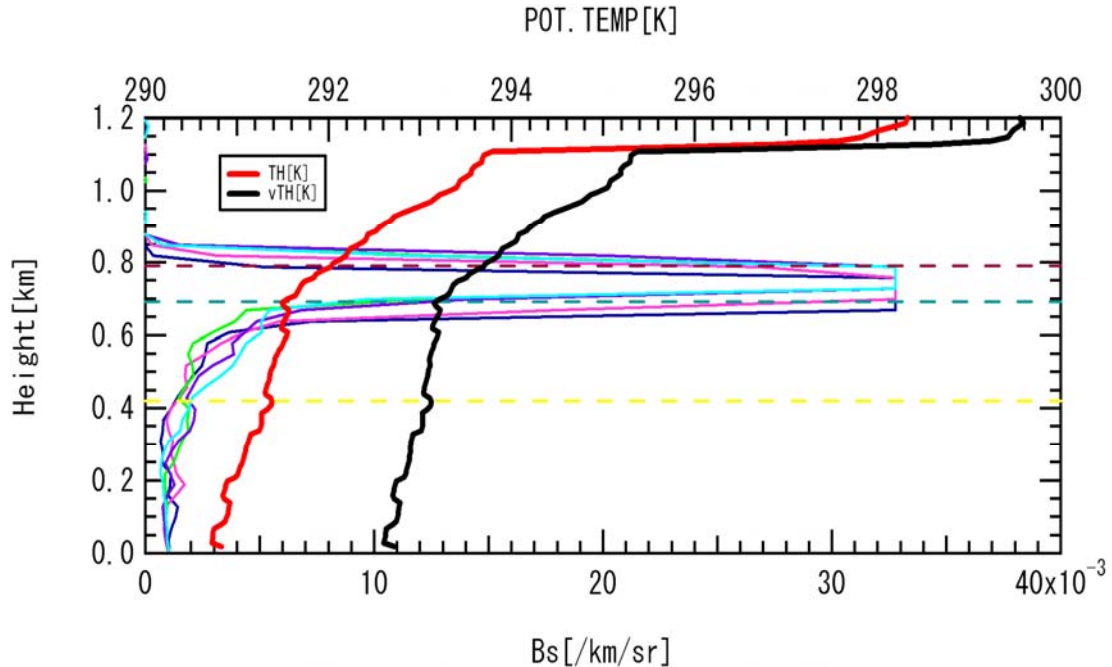


図 6-5 Sonde No.67 での温位, 仮温位[K]と Bs[/km/sr]

図 6-5 は Sonde No.67 の温位軸を拡大して表している。温位は、高度によって上昇する傾向にあるが、高度 0 m-700 m 間の温位の上昇率と、高度 700 m-1100 m 間の温位の上昇率とは、明らかに異なっている。一般的に、温位とは空気塊の中で水蒸気の凝結が起こらない限り保存される量であるから、高度 700 m を境に水蒸気の凝結が起こっていたとみなせる。つまり、Sonde No.67 では、この高度から雲がではじめていることを示していると考えられる。また、高度 700 m 付近で、thres\_cb1 が判別されており、温位の上昇率の変局点と一致している。また、前に述べたように Sonde No.67 での雲頂高度は 1100 m であり、この高度までの温位の傾きがほぼ一定である。これは、2 つの雲底判別方法のうち、閾値法による高度において既に雲は生じている可能性を示唆している。

このように、領域 I の雲に関しては、Bs 値の大きさ、相対湿度の高さ、温位の変曲点と一致するという観点から、thres\_cb1の方が cb1 よりも雲底らしいといえる。

領域 I の雲における cb1 と thres\_cb1 の高度差は、最大 288.5 m, 最小 22.5 m であり、平均 110.4 m であった。

従って、海洋上の最下層の雲底高度は、Vaisala の報告値 cb1 でなく、本論文で導入した閾値法による thres\_cb1 を用いた方が良いといえる。

尚、本章の最後に Sonde No.67 のような温位の変化がみられた例をまとめて図 6-8 に掲載する。

続いて領域Ⅱの雲の典型例なデータ例（図 6-6）を示す。

Sonde No. 16 2005/6/21 13:58 (JST)

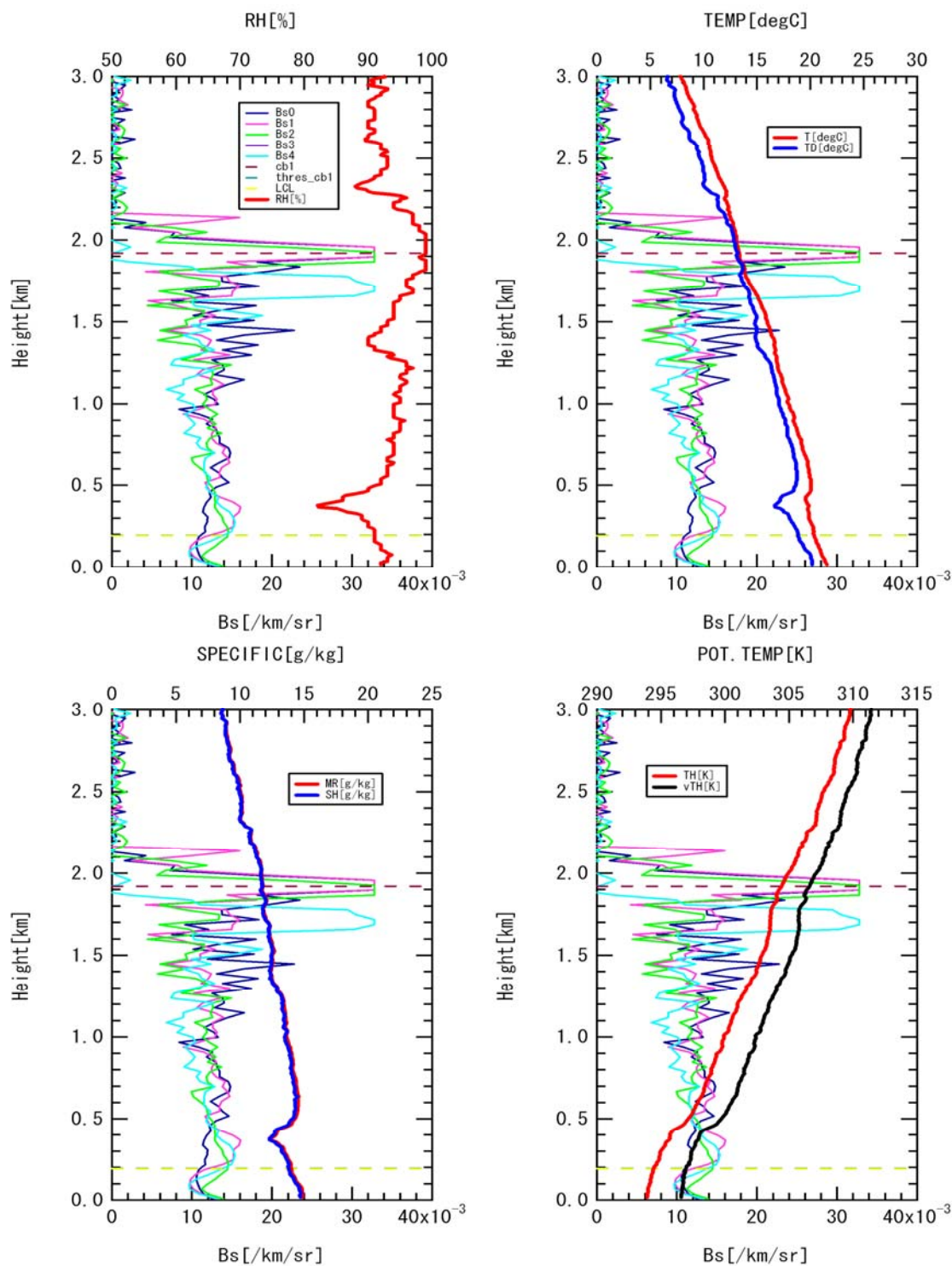


図 6-6 Sonde No.16 の気象データと Bs のプロファイル

Sonde No.16 (図 6-6) が領域Ⅱの雲にみられる典型例である。Sonde No.16 では  $cb1$  が 1.9 km を雲底と判断し、 $thres\_cb1$  が 0.2 km を雲底と判断している。 $Bs$  値は、閾値  $0.01 \text{ km}^{-1}\text{sr}^{-1}$  を海面付近から高度 2 km まで連続して越えており、明らかにエアロゾルの反射による値より大きい。更に、相対湿度も海面付近から 90% を越えるような値が連続している。2 つの雲底高度における  $Bs$  値、相対湿度に着目すると明らかに  $thres\_cb1 > cb1$  となることがわかる。領域Ⅰでは、2 つの雲底高度において  $Bs$  値、相対湿度がともに高く、その差が小さかったが、領域Ⅱの雲においては  $Bs$  値に大きな差があり、どちらがより雲底を表しているかといえば  $cb1$  である。しかしながら、 $thres\_cb1$  の高度でみられる  $Bs$  値も無視できるような値ではないため、霧や雨といった気象現象が起こっているのではないかと考えられる。

Sonde No.16 の放球前後における  $Bs$  プロファイルの時系列データをよりわかりやすく可視化した図を図 6-7 に示す。

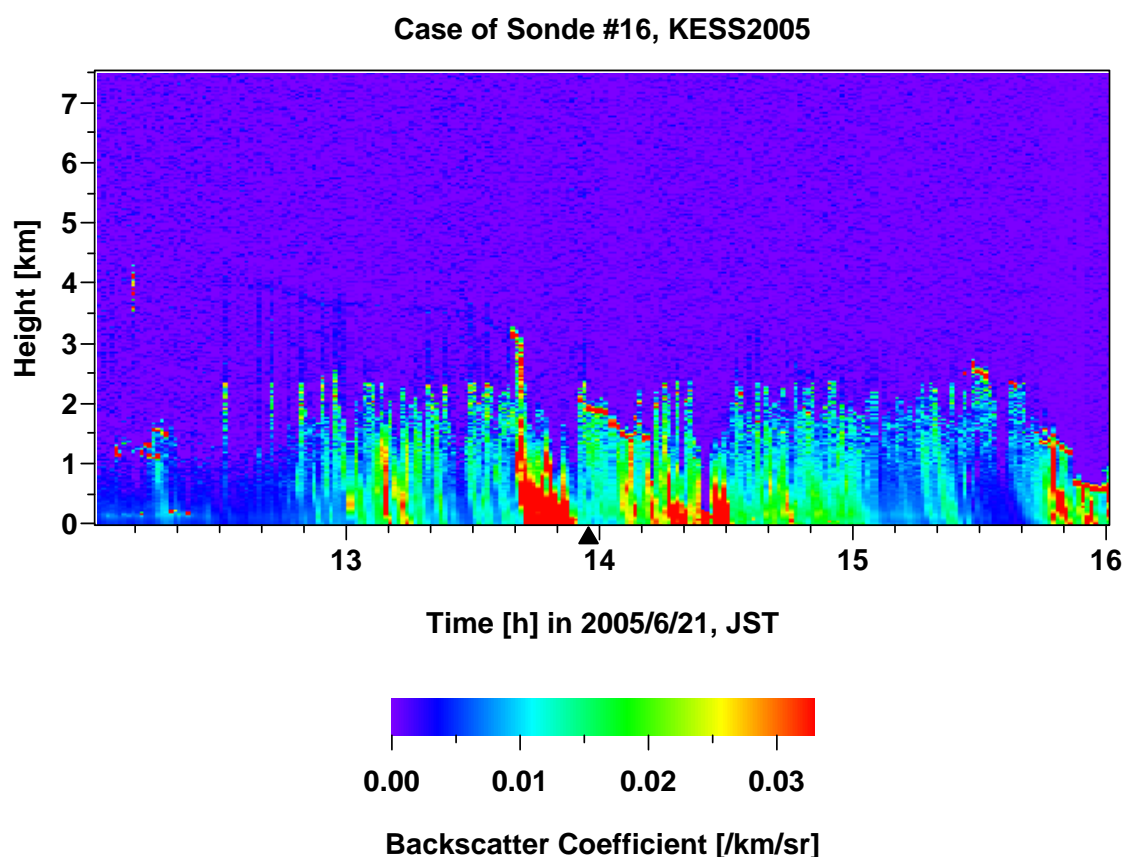


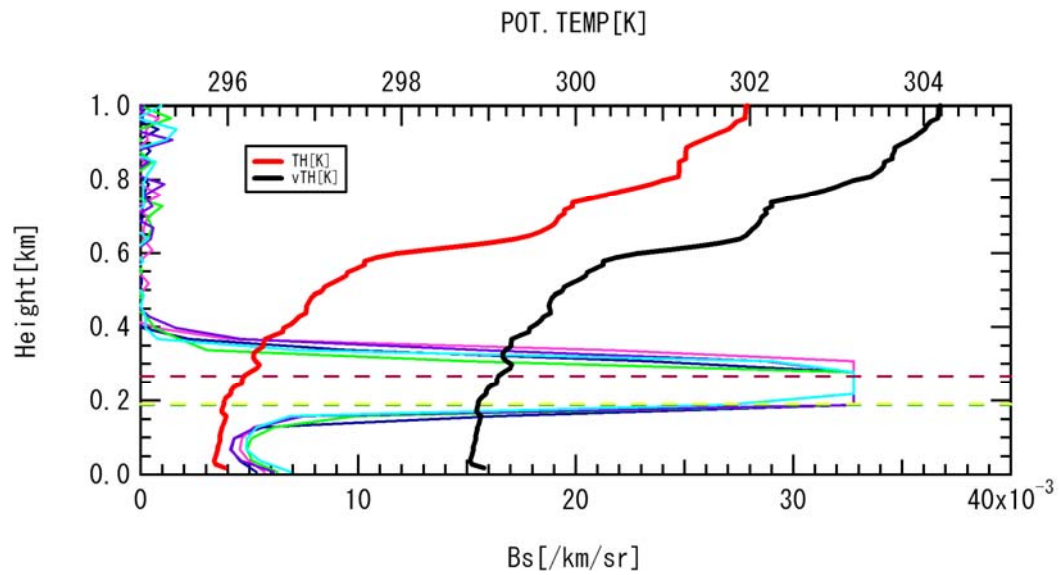
図 6-7 Sonde No.16 における  $Bs$  プロファイルの時系列データ (▲はゾンデ放球時刻を示す)

図 6-7 から、Sonde No.16 の放球時刻前後で、類似の Bs の変化がみられる。これは、高度約 2 km 付近に厚みのある雲があり、その高度から Bs のパターンが時間が経過するにつれ右斜め方向に変化しているため、雨が降っていることを示している。このように、Bs プロファイルの可視化データと組み合わせることで、雨または霧といった気象現象を判別することができる。

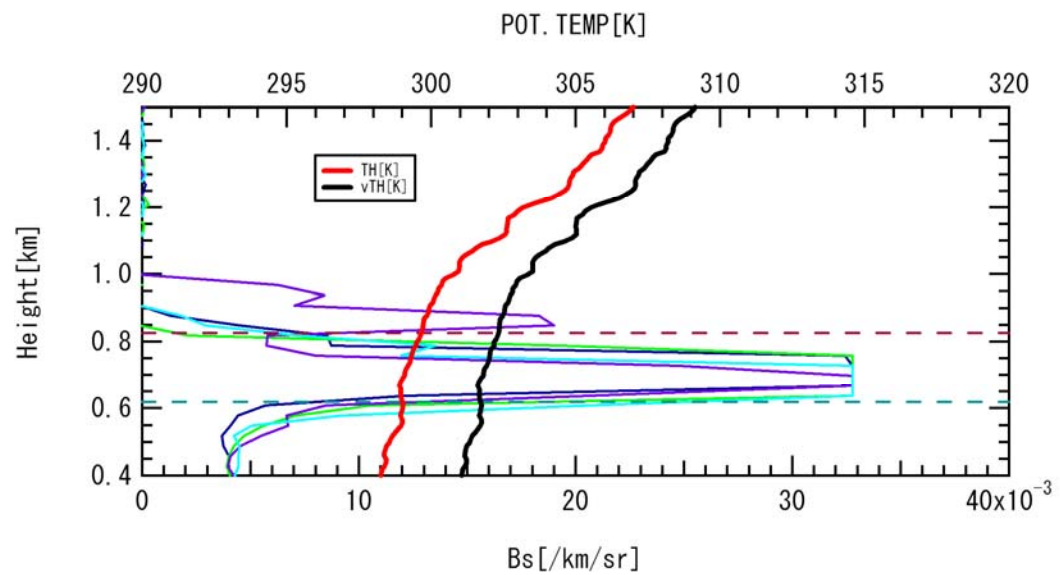
従って、領域Ⅱの雲での Vaisala による cb1 は雨や霧の上の雲底付近を示していると考えられる。Vaisala の報告値だけでは、霧や雨といった気象現象が生じていても、その情報を与えてくれないため、閾値法と分解能の高いデータの可視化表示を用いることは大気の情報を適切に掴む上で有効な手段といえる。



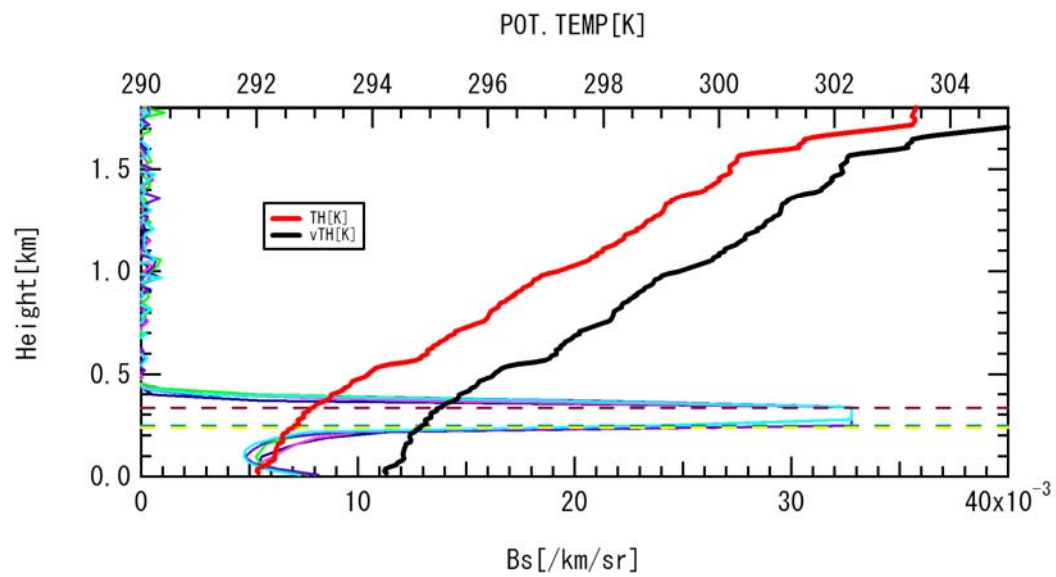
図 6-8 領域 I の雲にみられる温位、仮温位と Bs の高度変化例



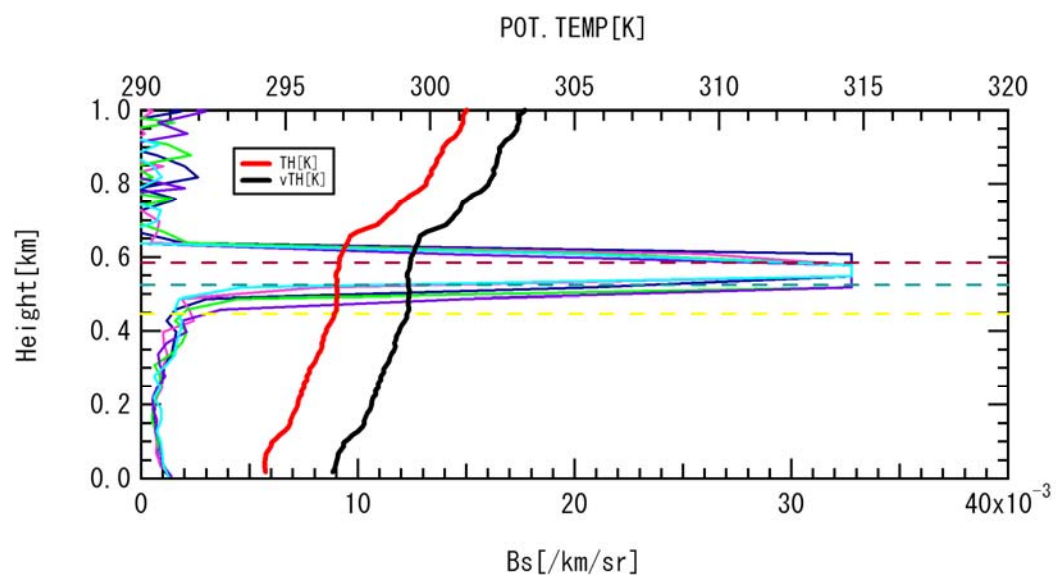
Sonde No.19



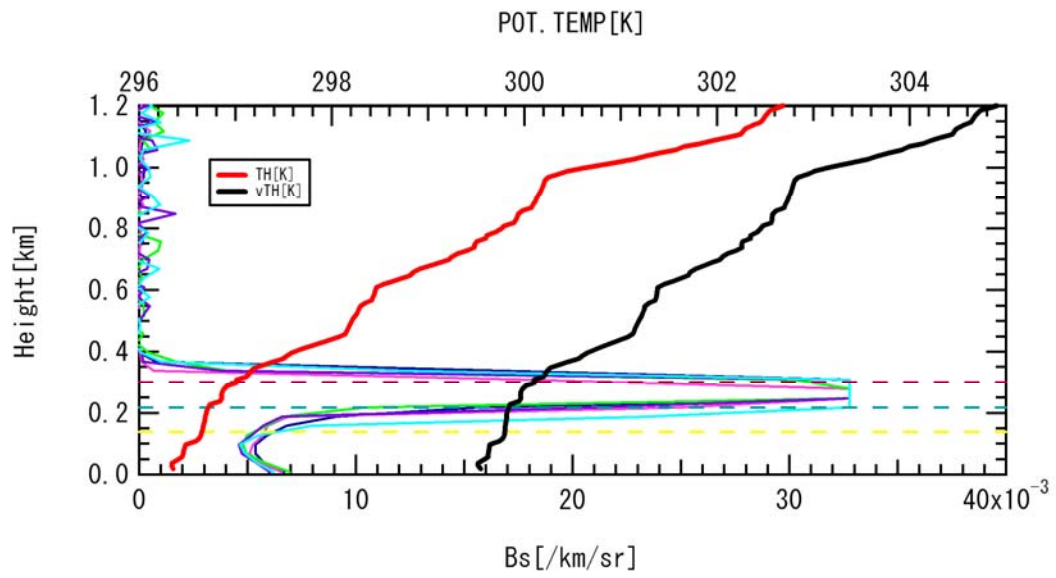
Sonde No.23



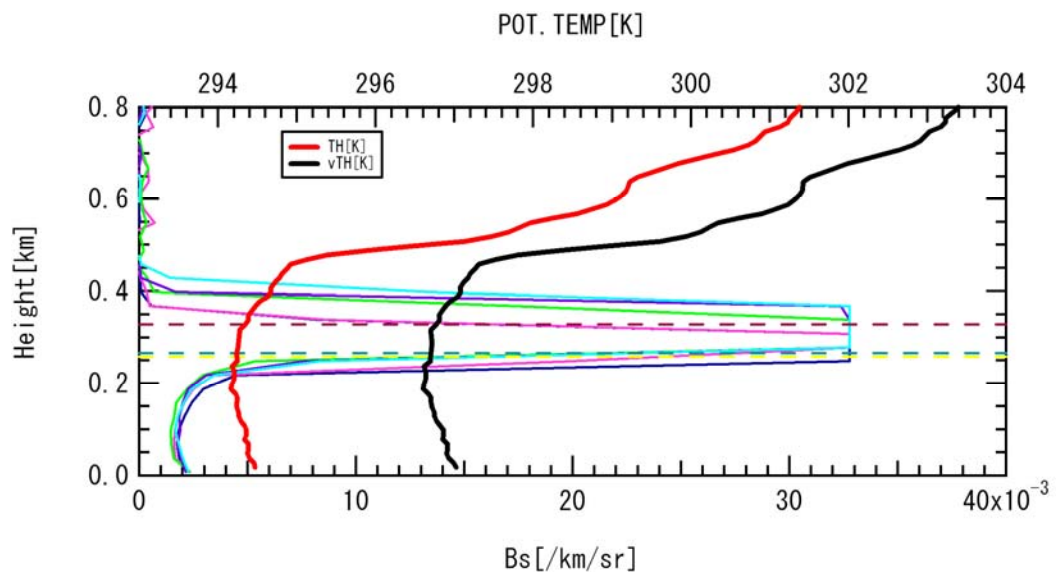
Sonde No.24



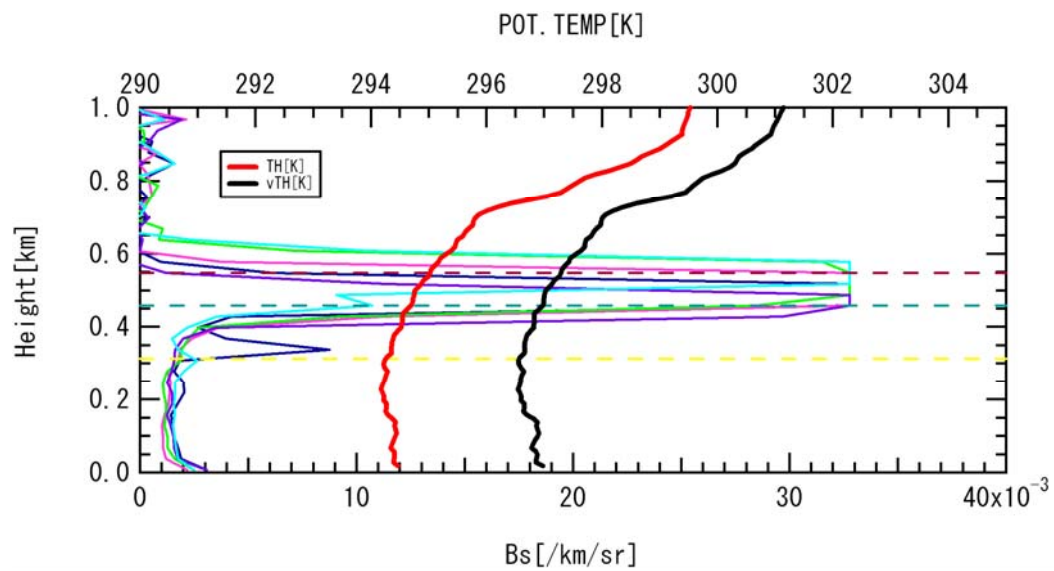
Sonde No.32



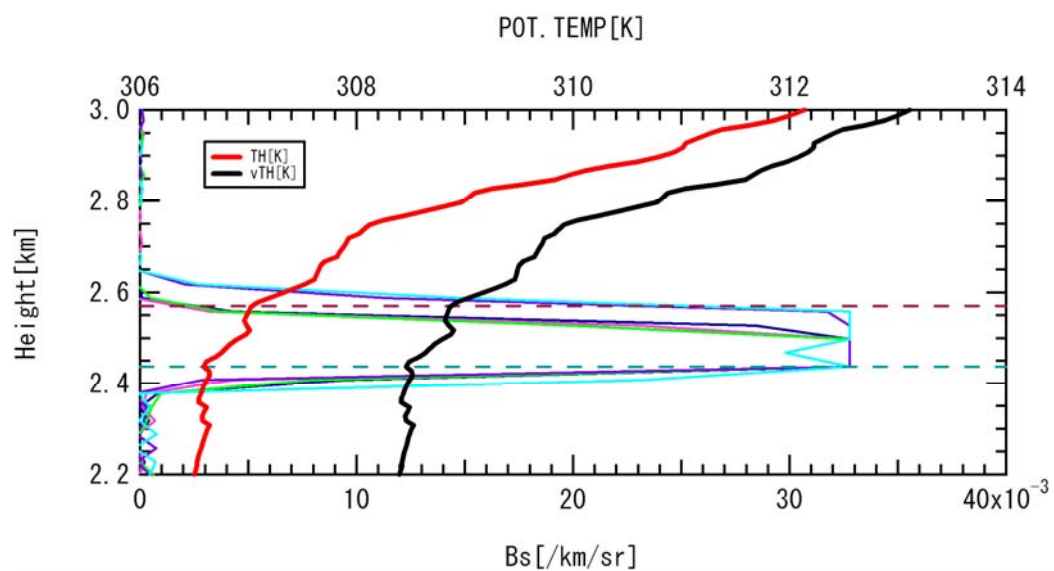
Sonde No.43



Sonde No.50

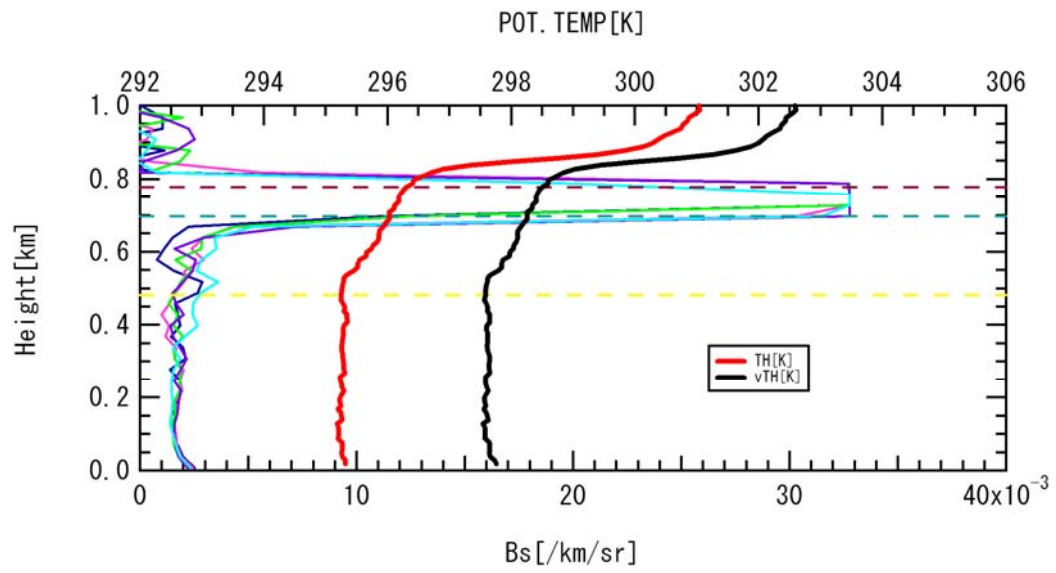


Sonde No.52

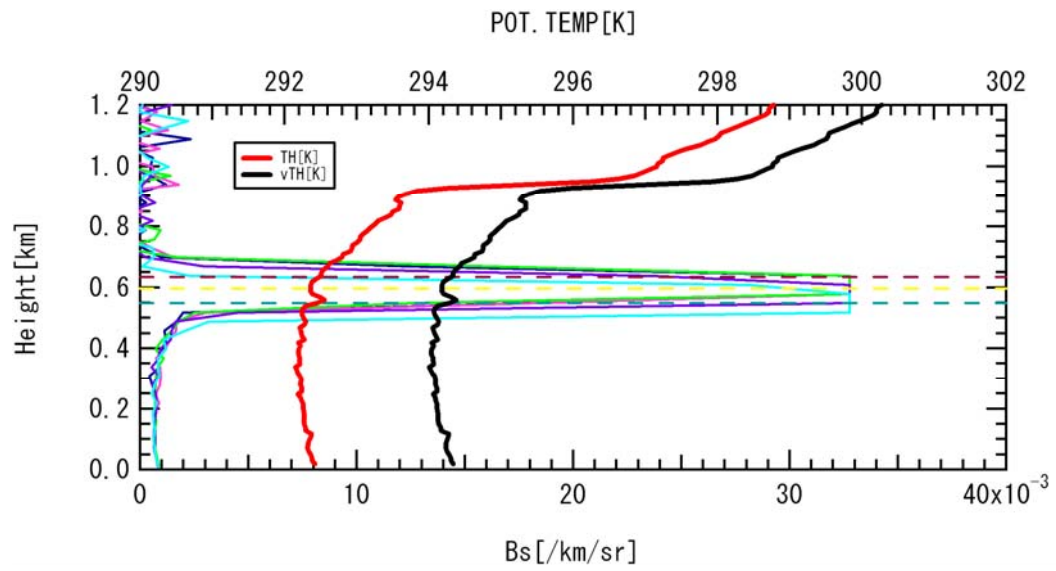


Sonde No.61

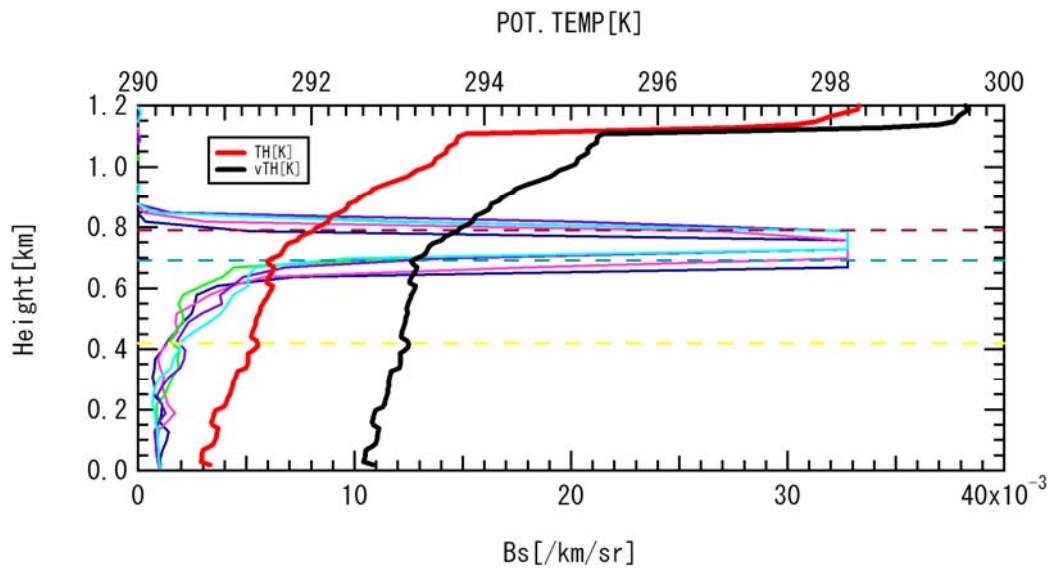




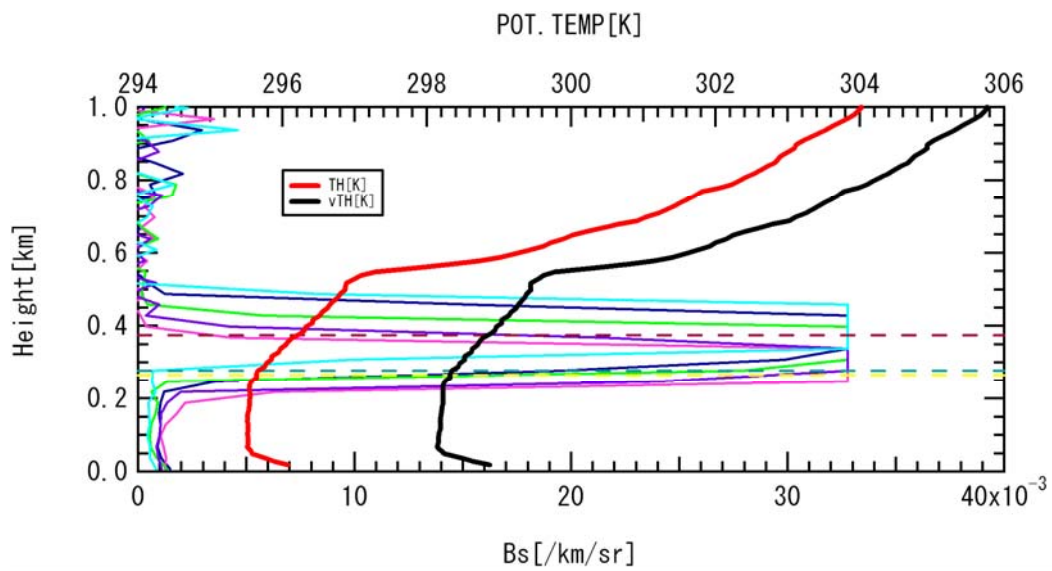
Sonde No.62



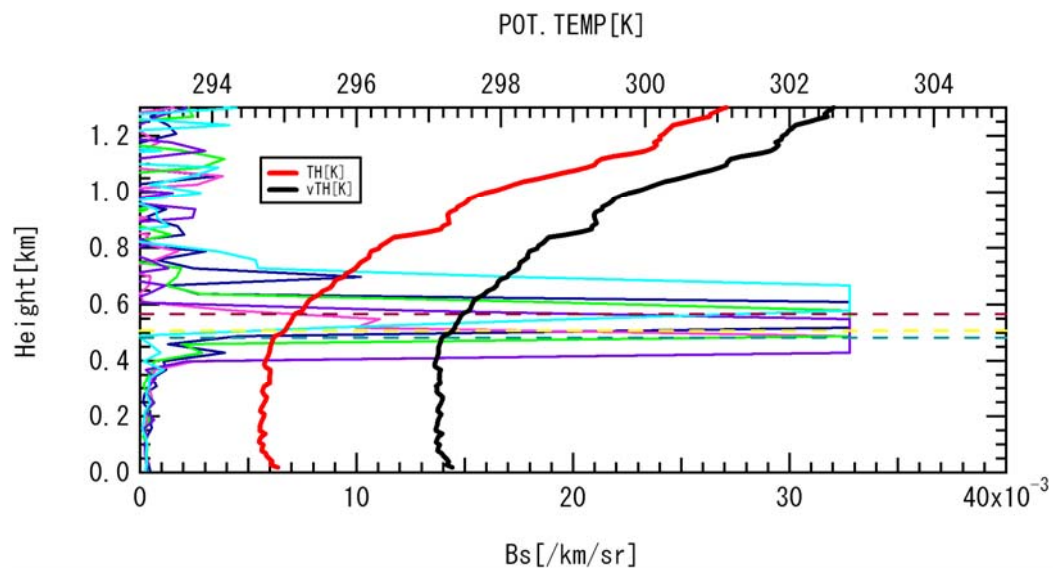
Sonde No.65



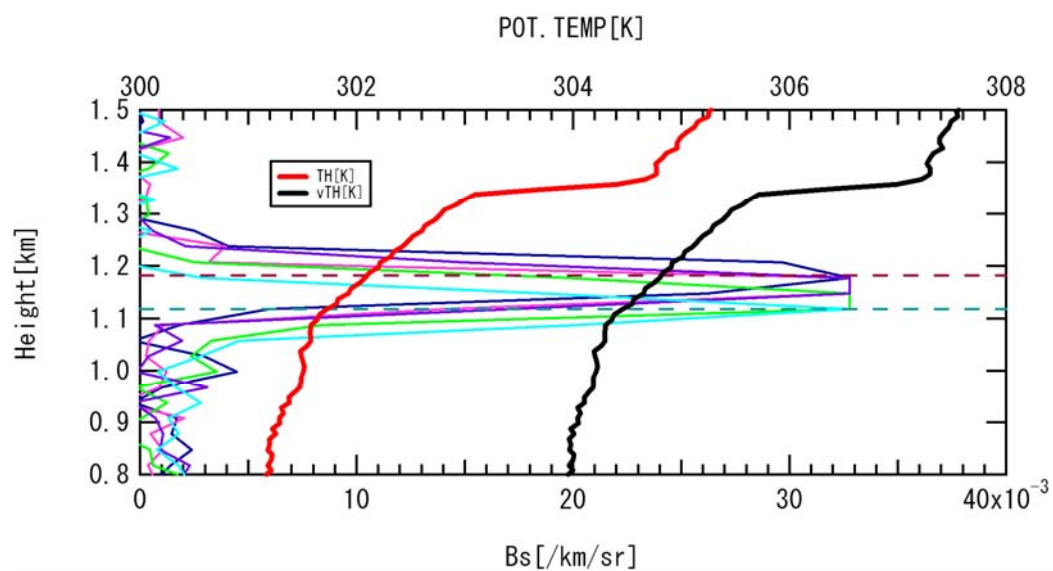
Sonde No.67



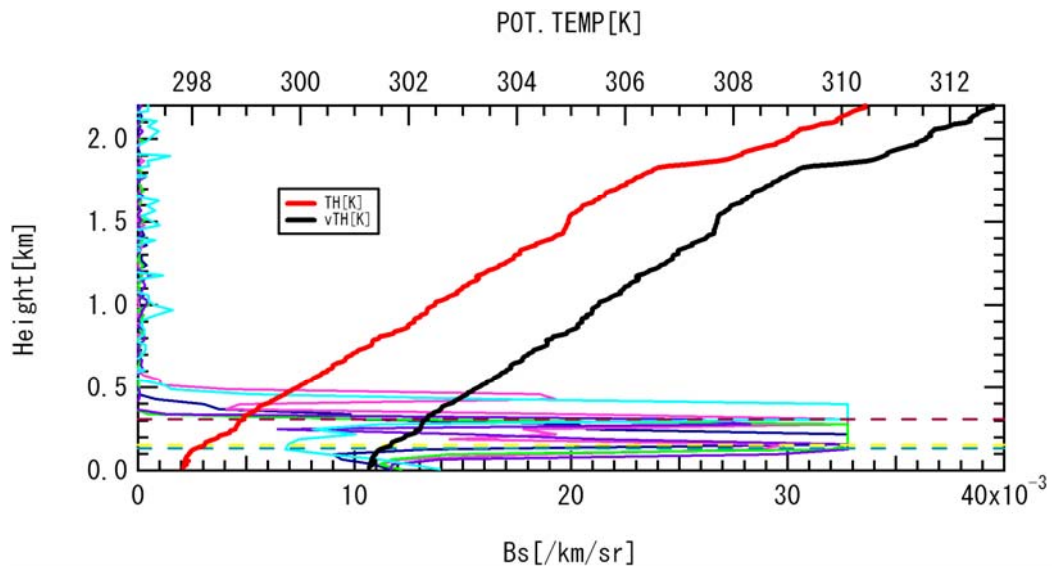
Sonde No.82



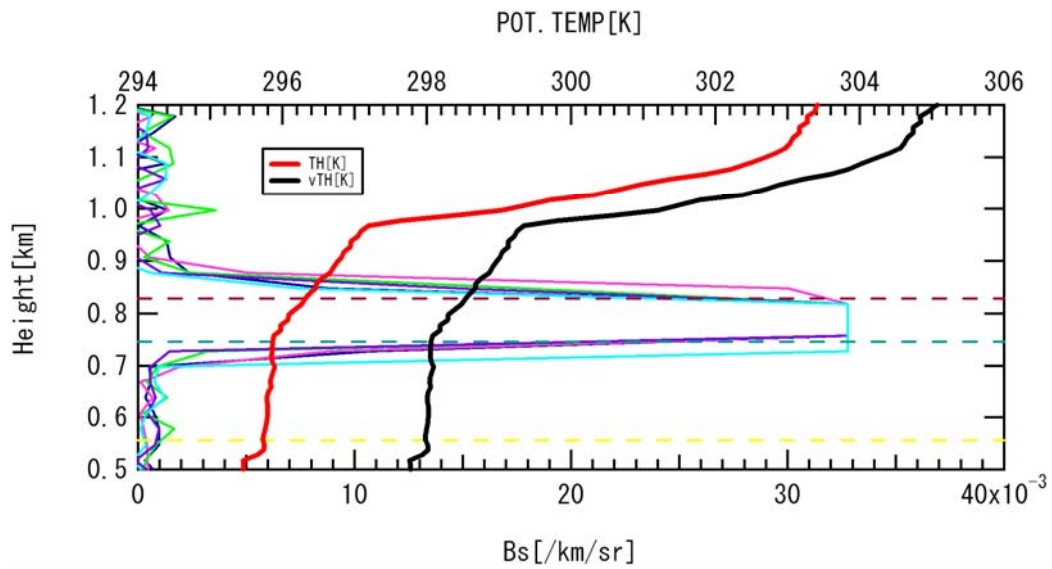
Sonde No.84



Sonde No.101

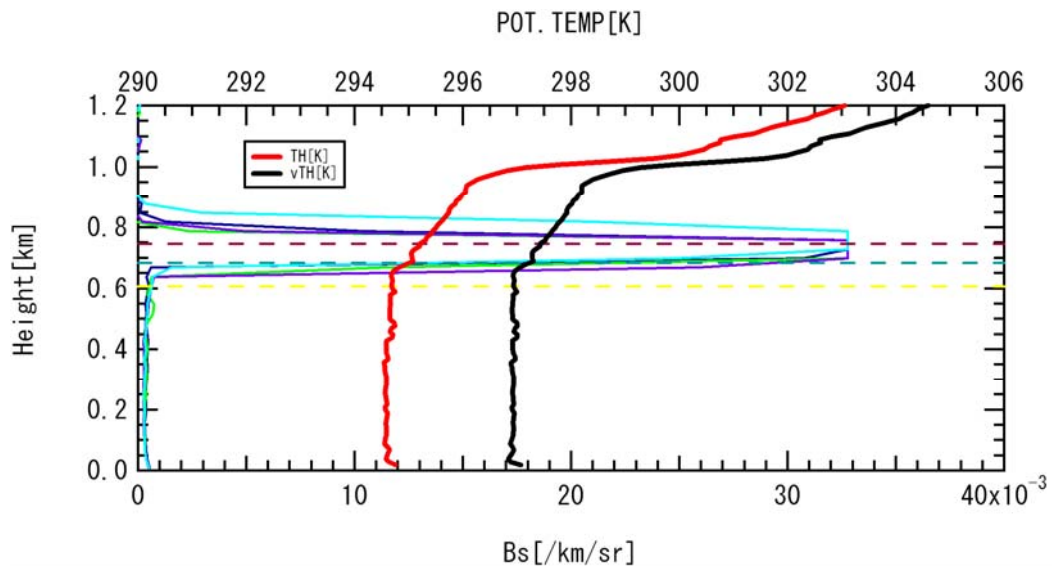


Sonde No.104

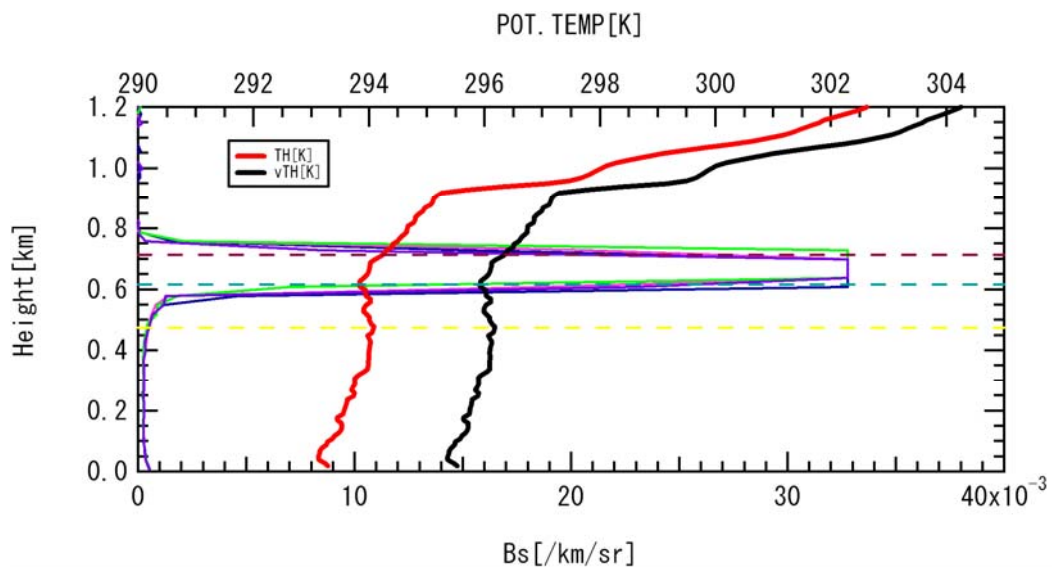


Sonde No.106

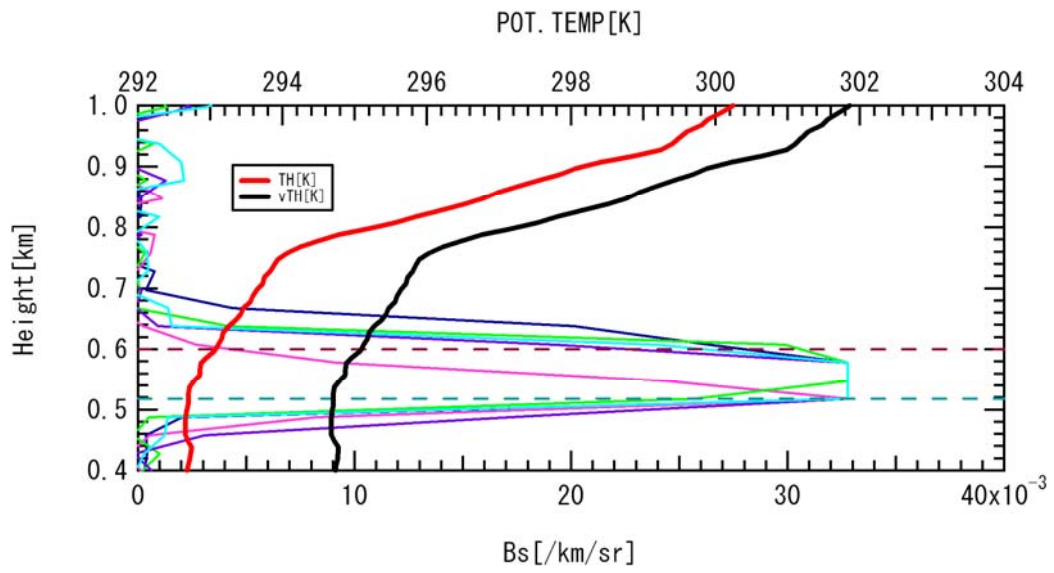




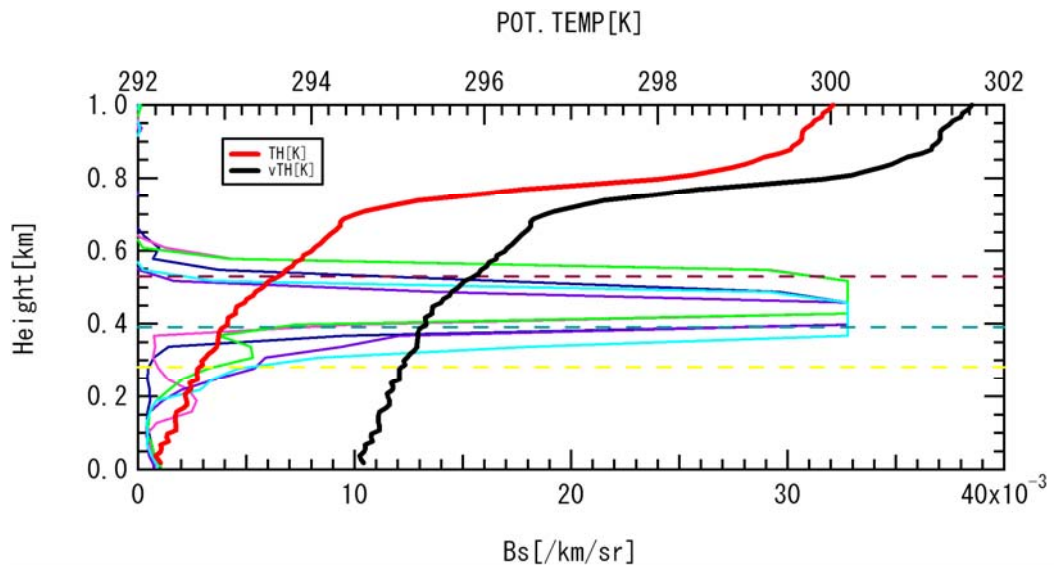
Sonde No.107



Sonde No.108



Sonde No.109



Sonde No.112

## 謝辞

本研究にあたり、東京海洋大学海洋工学部海洋電子機械工学科の村山利幸教授には、観測装置のデータ提供から論文指導等の多岐にわたるご指導に、深く感謝申し上げます。

東京海洋大学海洋工学部海洋電子機械工学科の関口美保准教授には、様々な支援及び助言をして頂き、深く感謝申し上げます。

多くの有用なご助言を頂いた、東京海洋大学海洋工学部海事システム工学科の小橋史明准教授には、深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] J. D. Klett, “Stable analytical inversion solution for processing lidar returns.”, Applied Optics, Vol.20, No2, pp.211-220, 1981.
- [2] レーザーハンドブック 第2版, レーザー学会編, 27章 レーザーレーダー(ライダー), 2005, オーム社
- [3] S. R. Pal, W. Steinbrecht, A. I. Carswell, “Automated method for lidar determination of cloud-base height and vertical extent.”, Applied Optics, Vol.31, No.10, pp.1488-1494, 1992.
- [4] CEILOMETER CT25K User’s Guide, Vaisala, 1999.
- [5] C. Weitkamp edited, “Lidar”, Chapter6, Visibility and Cloud Lidar, Springer, 2005.
- [6] 翁 一城 : 「シーロメーターを用いた海洋上低層雲の観測と解析」  
平成 18 年度卒業論文, 東京海洋大学海洋工学部, 2006.
- [7] 川原洋志 : 「シーロメーターによる海洋上低層雲、混合層の観測」  
平成 17 年度卒業論文, 東京海洋大学海洋工学部, 2005.
- [8] 小倉義光 : 「一般気象学」 東京大学出版社, 1984.
- [9] 近藤純正 : 「身近な気象の科学」 東京大学出版社, 1987.
- [10] Vaisala 社 HP  
<http://www.vaisala.com/>
- [11] 気象庁 HP  
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>